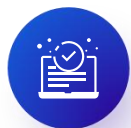


目录 / CONTENTS



01

成本组成

○ ————— PART ONE



02

成本鉴定

○ ————— PART TWO



03

配矿优化

○ ————— PART THREE



04

生产优化

○ ————— PART FOUR

铁成本的组成

成本 项目	单位	价格	本期成本			
			单位成本		总成本	
			消耗数量	金额	消耗数量	金额
一、直接消耗			1.744	3,142.242	231,804.48	417,592,102.73
(一)、原材料			1.744	1,773.39	231,804.48	235,676,732.61
1、自产烧结矿	t	1,009.68	1.314	1,326.95	174,654.56	176,346,042.26
2、自产球团矿	t	1,035.64	0.362	375.37	48,168.79	49,885,474.71
3、印度球团	t	1,051.67	0.068	71.07	8,981.13	9,445,215.64
(二)、辅料	t		-	8.23	-	1,093,989.51
1、萤石	t	#DIV/0!	-	0.18		23,734.46
(三)、燃料及动力	t			1,360.62		180,821,380.61
1、燃料			0.520	1,360.41	69,156.12	180,793,871.20
(2)、焦炭（龙门）	t	2,432.68	0.003	7.02	383.46	932,823.94
(3)、东鑫焦炭	t	2,722.31	0.093	253.08	12,354.56	33,632,919.83
(4)、焦丁	t	2,050.00	0.031	64.32	4,170.00	8,548,500.00
减：焦粉	t	1,020.00	-0.031	-31.62	-4,119.78	-4,202,179.68
焦丁	t	2,050.00	-0.031	-64.32	-4,170.00	-8,548,500.00
(10)、喷煤粉	t	2,085.37	0.144	301.01	19,183.00	40,003,573.12
2、动力				0.21		27,509.41
(1)、高炉煤气	m³	0.11	592.800	65.26	78,780,894.63	8,673,146.25
(2)、外购电力	kwh	0.72	79.115	56.68	10,514,041.00	7,532,339.71
(3)、氧气	m³	0.38	49.120	18.48	6,527,886.00	2,456,451.23
减：高炉煤气	m³	0.11	-1,309.476	-144.44	-174,024,449.63	-19,195,063.74
二、直接人工	元			12.30		1633988.41
三、制造费用	元			40.83		5426367.64
1、辅助材料	元			5.29		703,167.24
2、折旧费	元			29.48		3,918,127.33

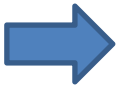
铁料费用

加工费用

铁成本的组成权重

项目	成本	占比
铁料费用	1773	56
燃料费用	1360	43
动力	79	2
工资	12	0
制造费用	26	1
煤气冲减	-80	
水渣冲减	-26	
其它冲减	-2	
折旧	30	
	3172	

项目	成本	占比
铁料费用	809	79
燃料费用	91	9
熔剂费用	42	4
动力	37	4
工资	9	1
制造费用	19	2
折旧	15	1
	1022	



控制吨铁成本的关键在原燃料费用

铁成本的主要组成关联

原料费	原料结构	配矿/工艺配置
	原料价格	采购
燃料费	生产指标	操作/工艺配置
	原燃料结构	配矿
	燃料价格	采购

➡ 配矿结构及生产操作是元燃料费的主要影响因素

铁成本的其它组成关联

熔剂费	原料结构	配矿/工艺配置
	炉渣 碱度	生产控制
制造费	产量	操作、结构
	工艺配置	
	介质单价	

支配其它费用
成本的因素依
然是操作和结
构

铁成本的评价-原燃费

原料费直接对比

不同单位吨铁原料费
直接比对

01

入炉原料吨度对比

入炉原辅料平均单价
与综合入炉铁品位

02

03

原料性价比对比

简单吨度排名
考虑 脉石下的吨度
单烧成本预算排名

铁成本的评价-燃料费

燃料指标对比

焦比对比、煤比对比、
固耗对比、烟煤配比

01

燃料价格对比

一级焦、准一、高硫
焦等配比

02

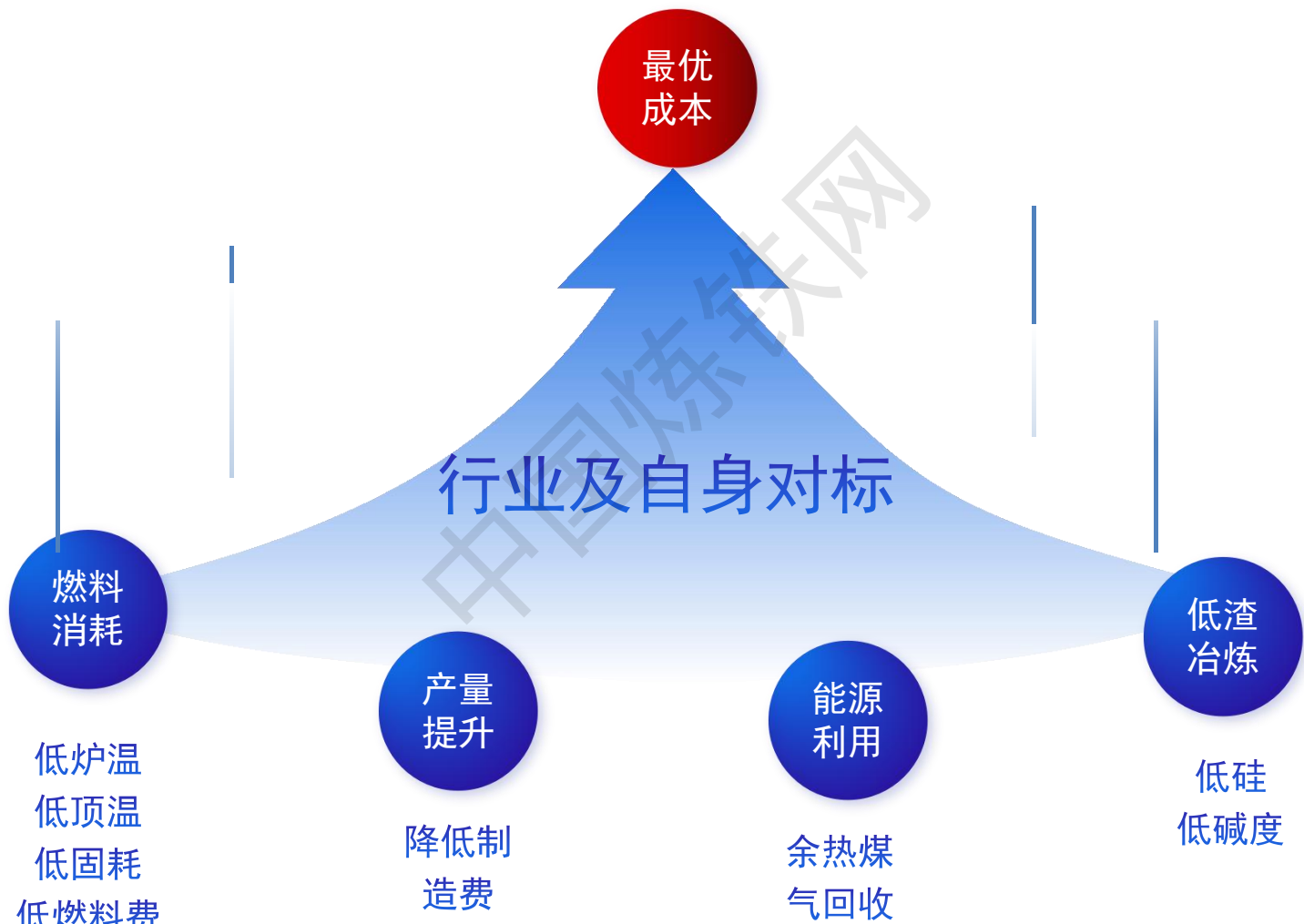
中国炼铁网

铁成本的评价-原燃料费



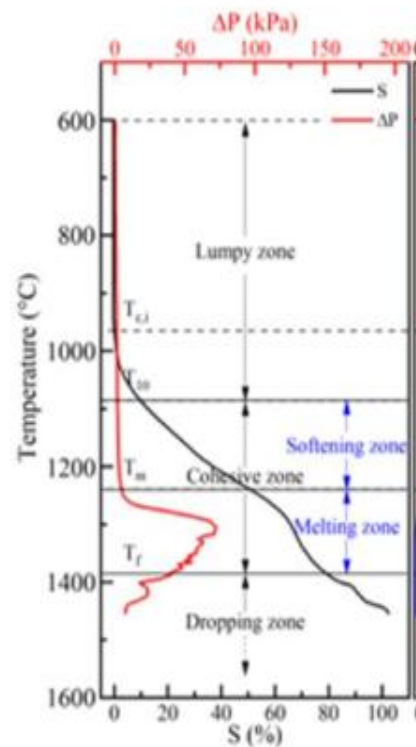
建立铁成本预算框架
对比不同原燃料结构下吨铁原
燃料成本变化

铁成本的评价-关键技术指标

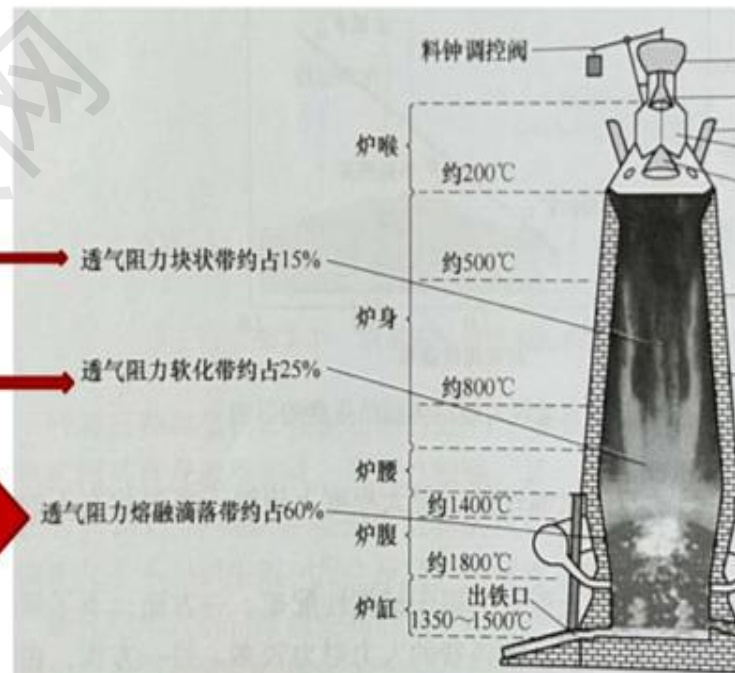


配矿影响-配矿目的

各种高炉原料影响各区域透气性指数的关键指标



	焦炭	球团矿	块矿	烧结矿
低温带	冷强度 (M40 M25) M10)	转鼓强度 低温还原 粉化率	含粉率 粒度 低温还原 粉化率	转鼓强度 含粉率 粒度 低温还原 粉化率
软化带	热强度 CSR 热反应性 CRI	抗压强度 热膨胀率 荷重软化 性能	热爆指数 荷重软化 性能	粒度 荷重软化 性能
熔滴带	热强度 CSR 热反应性 CRI	熔滴性能 还原性	熔滴性能 还原性	熔滴性能 还原性



以上图片摘自《铁矿石优化配矿实用技术》-许满兴、张天启编注

铁成本的优化-原料配矿目的



配矿影响-配矿目的

为了达到更佳的炼铁指标和更低的成本，对烧结矿质量指标关注度从低到高的排序应为：

- 1、**转鼓指数**，转鼓指数主要影响的是烧结矿在转运过程中的粉碎情况。
- 2、**粒度**，主要影响软熔带以上的气流，平均粒度大了有利于改善透气性，但炉料比表面积也会减小，间接还原度会降低，煤气利用率降低，因此最佳的粒度控制方向是提高粒度的均匀度，减少入炉矿大于40mm和小于5mm的比例。
- 3、**低温还原粉化指数RDI**，主要影响中、低温区的透气性，这个区域占总阻力损失的25%。
- 4、**软化、熔滴性能**，它主要响高炉软熔区的透气性，大量学术研究证明，高炉高温区的阻力损失占总阻力损失的60%。
- 5、**还原性**，它不但影响高炉燃料比，而且还原性差的烧结矿还会造成软熔区间加大，透气性变差。
- 6、**稳定**，入炉原料质量波动是大忌。烧结重点要抓过程的稳定，包括配料结构的合理稳定、成份稳定、水碳稳定、终点稳定以及原燃料质量的稳定等等。

配矿影响-配矿目的

1. 烧结矿综合合格率（品位、碱度、FeO）：85%以上，目标为100%；
2. 还原性RI：大于85%，目标为90%；
3. 低温还原粉化指数 $RDI_{+3.15mm}$ ：大于65%，达到72%以上时，可考虑适当降低烧结矿FeO来改善RI；
4. 软化开始温度 T_{10} ：大于1100℃，目标为1150℃以上；
5. 软化区间 $T_{40}-T_{10}$ ：小于150℃，目标为小于100℃。
6. 熔滴区间 T_d-T_s ：小于150℃，目标为小于100℃。
7. 转鼓强度：74%以上，转鼓强度过高时应及时研究、分析烧结矿是否出现液相过剩、气孔减少、粒度过大等影响软熔性和还原性的现象，如果比较明显的话，应考虑通过调整原料同化温度、降低配碳等措施改善。
8. 5~10mm粒级：平均不超过30%，最大不超过35%。
9. 大于40mm的比例：不大于10%，目标是0。
10. 平均粒度：不大于15mm，在高炉气流稳定的情况下，可考虑继续减小平均粒度，加大入炉矿比表面积，以获得更好的间接还原度，提高煤气利用率。

配矿影响-铁矿原料基础知识

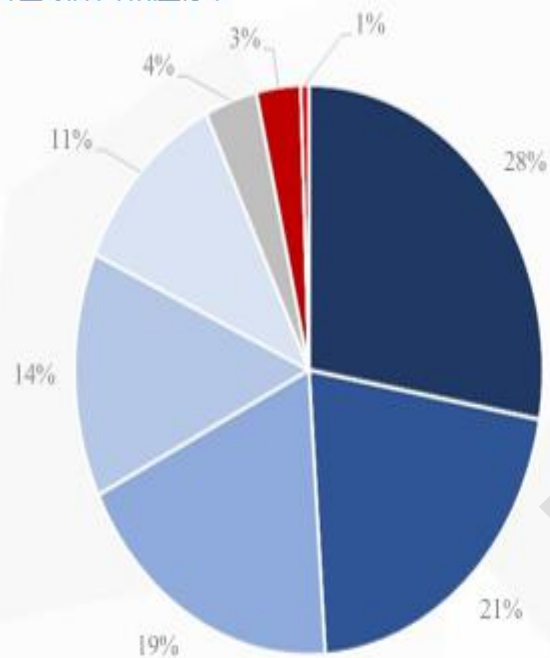
铁矿分布

基础特性

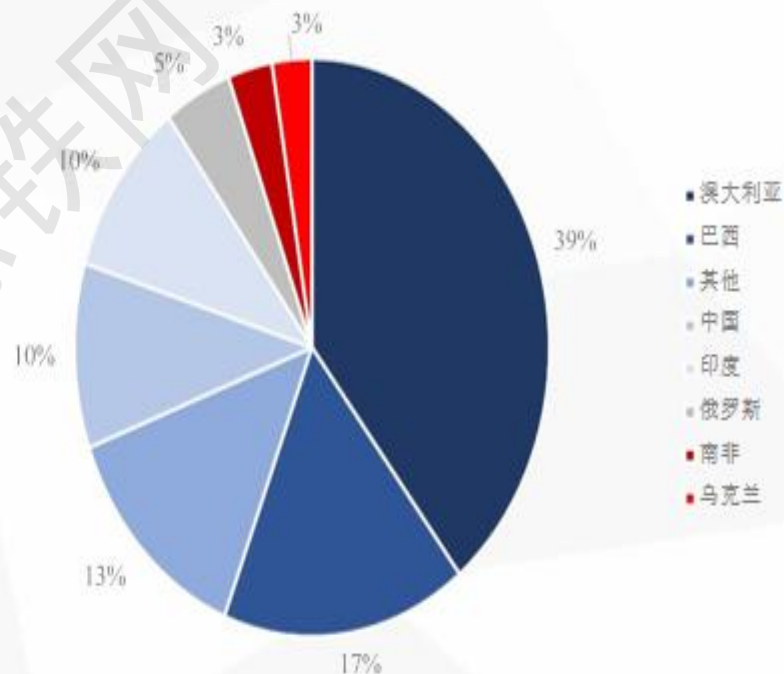
烧结成矿机理

配矿影响-原料储备

2020年全球铁矿石储量分布

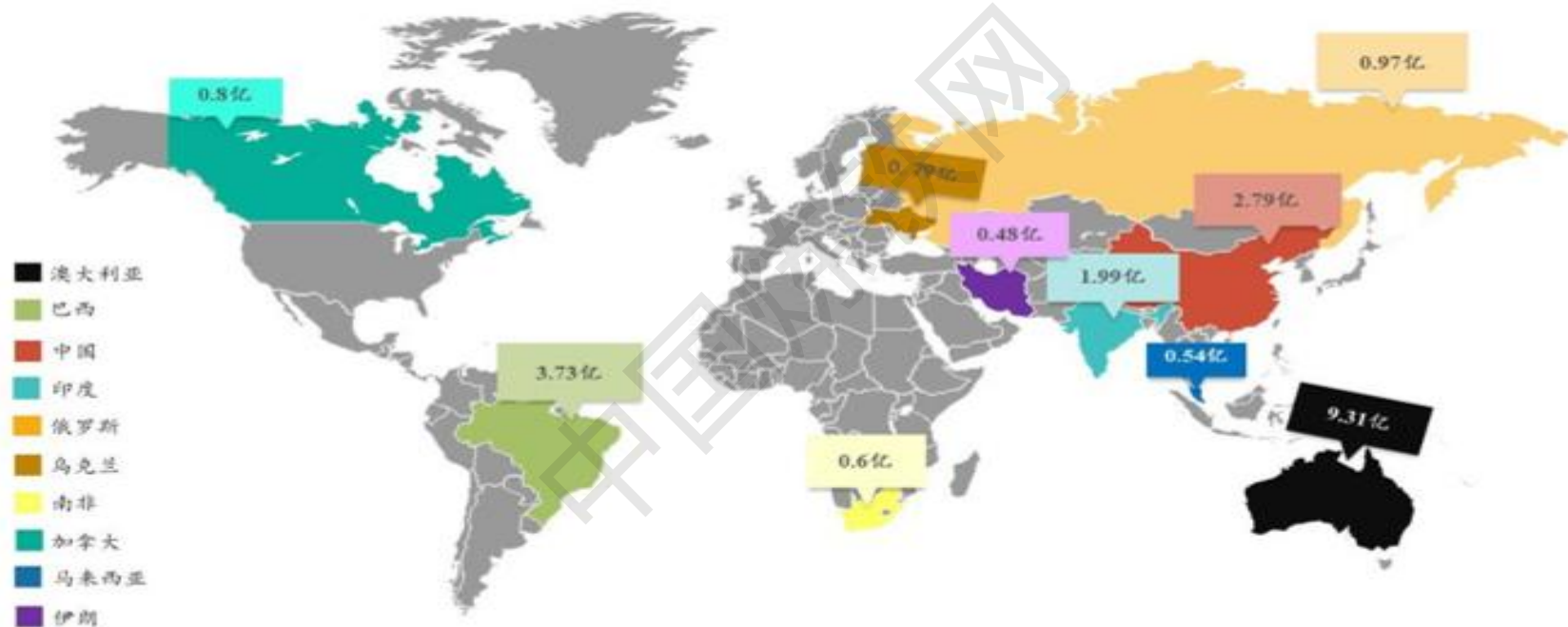


全球铁矿石产量分布



配矿影响-原料分布

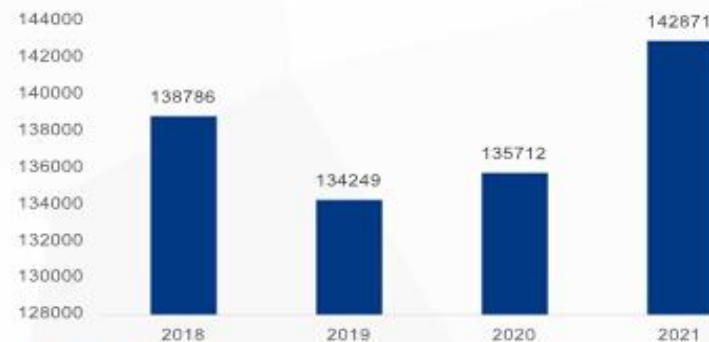
全球主要铁矿石产地分布
(产量以2020年为基准, 单位: 亿吨)



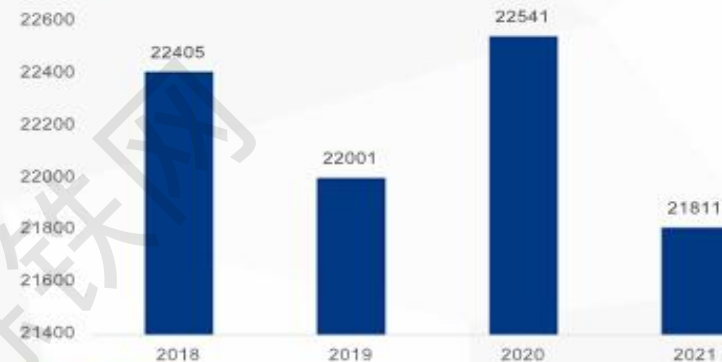
数据来源: 国际统计局

配矿影响-原料基础分布

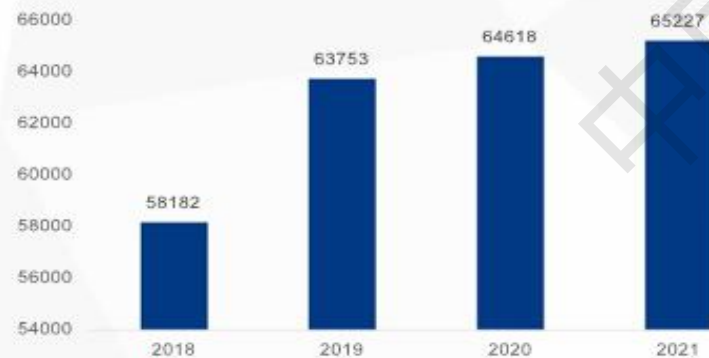
粗粉（万吨）



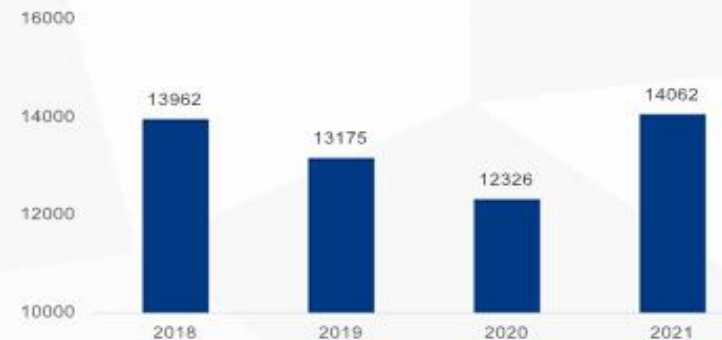
块矿（万吨）



精粉（万吨）



球团（万吨）



配矿影响-四大矿山矿种及成分

矿山	品名	Fe	Si	Al	S	P	H ₂ O	LOI
力拓 (Riotinto)	PB粉	61.5	3.75	2.35	0.1	0.02	9	5.3
	PB块	62.3	3.1	1.6	0.09	0.02	4	5.5
	杨迪粉	58.5	4.5	1.6	0.07	0.05	9	9.6
	罗布河粉	56.9	4.85	2.85	0.02	0.03	7.5	10.4
必和必拓 (BHP)	纽曼粉	62.5	5.5	2.7	0.06	0.1	8	3.1
	纽曼块	63.2	3.5	1.4	0.02	0.08	4	4.4
	麦克粉	61	4.5	2.3	0.04	0.08	8	5.8
	金布巴粉	60.5	6	3.3	0.06	0.125	8.1	4.4
	杨迪粉	57	6.2	1.7	0.05	0.05	10.5	10.3
FMG	FMG混合粉	58.5	5.5	2.5	0.035	0.075	8	7.5
	超特粉	56.5	6.02	2.7	0.033	0.052	9	8.7
	国王粉	57.3	5.4	2	0.035	0.08	9.5	10.5
淡水河谷 (vale)	IOCJ	65	1.75	2.1		0.04	8.5	1
	BRBF	62.5	5.2	1.8		0.07	7.5	2.7
	SSFG	62.5	3.5	1		0.04		1.5
	SSFT	62	4.4	0.9		0.049	6.5	1.6
	SFHG	59.9	9.3	2.1		0.065	9	2.5

配矿影响-我国铁矿资源概况

- 我国铁矿资源保有储量占世界的10%左右，居俄罗斯、澳大利亚、巴西之后
- 我国铁矿资源可采储量低，仅占资源总量的20.45%
- 品位低，平均品位仅为32.67%左右，低于世界平均水平11个百分点。
- 我国累计探明铁矿资源储量628.82亿吨，其中基础储量261.84亿吨
- 按目前的开采速度计算，保证年限不到60年

配矿影响-我国铁矿资源概况

- 中国铁矿资源分布较广，储量较为集中的地区有鞍本地区、冀东地区、四川西昌、山西太古岚、湖北大冶及内蒙古白云鄂博等地区。
- 磁铁矿是主要铁矿石原料，储量和开采量均居首，探明储量约占总储量50%，分布于辽宁、河北、山西、山东、安徽和内蒙古等省区。
- 赤铁矿含铁量在30%~50%，含磷高，属难选矿石，探明储量约占总储量18%，主要分布在辽宁、湖北、河北、四川、湖南和内蒙等省区。
- 钒钛磁铁矿含铁品位一般在30%以下，伴生V、Ti等贵金属，矿床规模大，易采易选，探明储量约占总储量14%，主要分布于四川和河北两省。



配矿影响-成矿基础理论1

烧结性能不是一个较为简单的技术理论问题，因为烧结的成矿过程是一个复杂的物理化学变化过程，它既有低温下的固相反应和新相生成，又有在高温下的粘结相和液相生成，还有在冷却过程中的结晶、再结晶和相变过程。影响烧结过程成矿和固结的因素也很复杂，既有矿种化学成分和粒度的影响，又有碱度、配碳、加热和冷却速度的影响，还有氧化速度的影响等等，其中矿种对烧结成矿和固结的影响是一个基本因素，矿种和配矿的不同对烧结生产综合反映出来的是烧结生产率和成品矿的强度，是烧结生产最基本的两个问题，即产量和强度问题。

配矿影响-成矿理论2

烧结矿的成矿经历了三个阶段分别为固相反应、液相生成和冷凝固结。

1) 烧结过程中的固相反应

烧结过程中的固相反应是指混合料中的各种离子在一定的温度下克服相互之间的结合力，在晶格内部的相对位置发生变化，通过扩散作用迁移至与它相邻的其它晶格中而发生的反应。固相反应能够顺利进行的首要条件是温度，而且这个过程是一个放热的反应过程。在这个反应过程中，通过燃料的燃烧产生的高温废气加热了烧结料，这为固相反应的进行创造了条件。

液相形成温度较低，当铁酸钙（ $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ）液相生成后，随着 Fe_2O_3 含量的不断增加，其熔点是下降的；铁酸钙不但熔点低，而且生成速度快；当存在较高 CaO 的情况下，铁酸钙的生成量才能增大。

在烧结过程中液相的生成量要适宜，如果液相量太少则粘结周围矿物的量少，导致烧结矿的强度不够，液相量过多则产生过熔，从而使得烧结矿致密，气孔率下降，导致还原性变差。

配矿影响-成矿理论3

随着燃烧带下移，料层上部烧结矿便开始冷却结晶。烧结矿在冷却过程中仍有许多物理化学变化发生，冷却过程对烧结矿的品质影响很大。

随着烧结矿层的温度降低，其液相中的各种化合物开始冷却结晶。结晶的顺序依次为：熔点高的矿物首先开始结晶析出、所剩液相熔点依次越来越低，然后才是低熔点矿物析出，来不及结晶的就变成玻璃质；因此，烧结矿的矿物组成就是在高熔点矿物周围出现低熔点矿物。

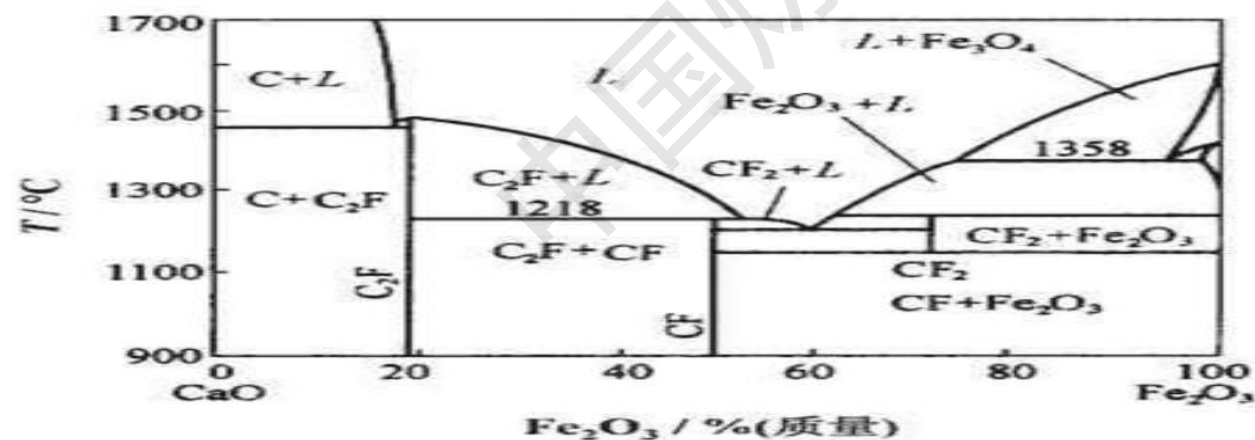


图 1.6 CaO-Fe₂O₃ 二元相图

配矿影响-冶金特性1

同化性的概念

铁矿粉的同化性是指在烧结过程中与 CaO 熔剂反应的能力，它表征铁矿粉在烧结过程中生成液相的难易程度，是烧结矿有效固结的基础。

不同产地、类型的铁矿粉，其同化性差别明显，澳大利亚的褐铁矿、半褐铁矿、赤铁矿以及南非赤铁矿的同化性较高，而巴西赤铁矿和磁铁精粉同化性较低。

实际烧结过程要求混合矿有合适的同化性，故在烧结配矿时应运用基于铁矿粉铁矿粉同化性互补的配矿方法，以求满足更好的低温烧结技术条件。

配矿影响-冶金特性2

同化特性

2.1 同化特性

铁矿粉的最低同化温度见图3。由图3可以看出:OR-4,OR-8和OR-12铁矿粉的同化温度较低,分别为1 258,1 256,1 254 ℃;同化温度中等的为OR-1,OR-2,OR-3,OR-5,OR-6,OR-7,OR-10和OR-11铁矿粉;同化温度最高的是OR-9铁矿粉,达到1 340 ℃。

同化性过强的铁矿粉在烧结过程中会生成大量的液相,造成料层中起骨架和透气作用的核矿石减少,恶化烧结燃烧带透气性,降低烧结效率和下层烧结矿的质量;同化性差的铁矿粉液相生成量少,不利于烧结矿的粘结。因此在烧结配矿中,同化温度低的铁矿粉(OR-1,OR-4,OR-8和OR-12)需和同化温度高的铁矿粉(OR-9)搭配使用,从而获得适宜的同化性能。

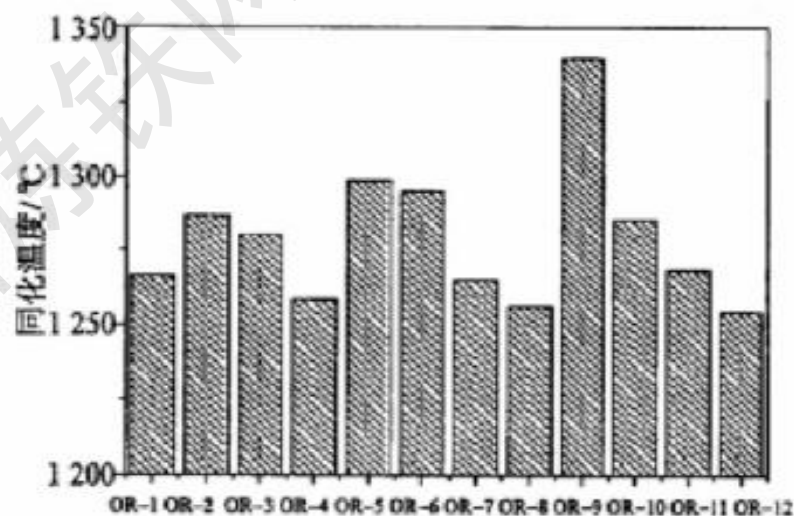


图3 铁矿粉同化温度

Fig. 3 Assimilation temperature of iron ore fines

配矿影响-冶金特性3

液相流动性

2.2 液相流动性

铁矿粉的液相流动性指数见图4。由图4可见：液相流动性较差的为OR-2, OR-6(1 280 ℃时液相流动性指数为0), OR-10 和 OR-11 铁矿粉；液相流动性较好的为OR-5 和 OR-7 铁矿粉，其中OR-7 铁矿粉的液相流动性指数达到5.47；其他铁矿粉的液相流动性适中。

铁矿粉的液相流动性好，则液相易与周围未熔成分充分接触，有利于提高烧结矿的固结强度。但液相流动性过大会使料层形成大孔薄壁结构，烧结矿强度变差。因此，在实际烧结生产过程中，若液相量不足，可适当加入OR-5 或 OR-7 粉；如果液相过多，则应适当加入OR-2, OR-6 和 OR-10 粉等流动性较弱的铁矿粉，以综合改善烧结透气性和固结强度。

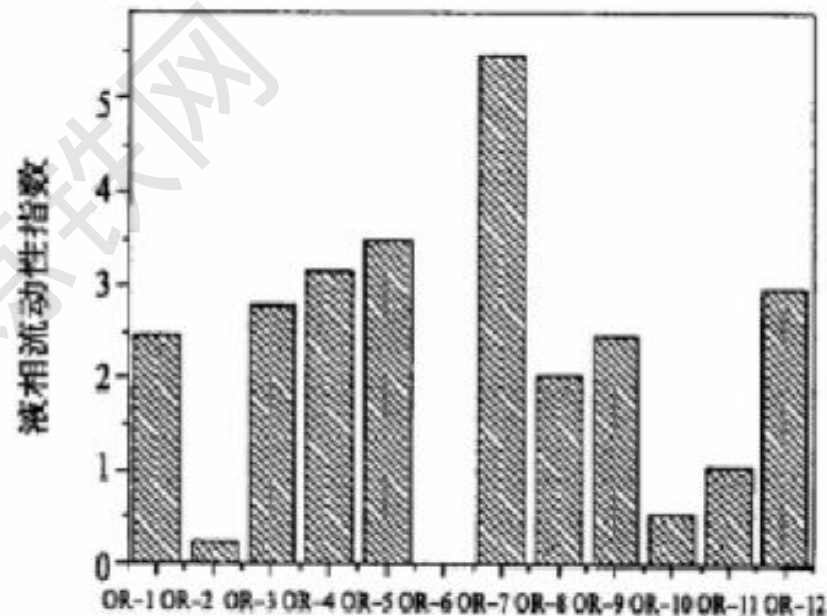


图4 铁矿粉液相流动性指数

Fig. 4 Liquid phase fluidity index of iron ore fines

配矿影响-冶金特性3

铁酸钙生成性能

铁酸钙生成特性是指在烧结过程中复合铁酸钙的生成能力，铁矿粉烧结的理论和实践都明：在烧结粘结相中,复合铁酸钙粘结相是最优的，增加烧结矿中的复合铁酸钙含量，既有利于提高烧结矿的强度,又有利于改善烧结矿的还原性。如果烧结矿中的复合铁酸钙数量较多且大多以熔蚀交织状态存在,则烧结矿的还原性和强度均会明显改善。本文以包

冶金特性

试样名称	同化温度	液相流动性指数	黏结相强度	固相连晶强度	CF生成能力
麦克粉	1107	3.08	3965	8270	6.06
铁粉硫酸渣	1276	5.41	1298	12895	6.49
2#造堆料	1189	4.76	1916	8073	6.38
2#上机料	1272	3.6	1797	7298	6.75
超特粉	1254	4.54	1453	7240	7.98
翼城65品	1304	2.09	7271	14154	10.12
罗布河粉	1110	4.31	4598	9272	15.41
1#造堆料	1195	8.6	2062	6645	9.18
1#上机料	1152	3.78	2567	3651	9.7
河南矿粉	1262	3.81	1054	16061	8.38
摩卡粉	1164	4.39	1113	7830	14.16
秘鲁粉	1312	0.97	7574	15558	5.96
浮山65品	1313	0.71	9819	16859	6.81

冶金特性

试样名称	同化温度	液相流动性指数	黏结相强度	固相连晶强度	CF生成能力
印度粉	1133	5.28	2635	14177	13.28
杨迪粉	1065	4.65	5144	5637	13.15
河南62品	1224	8.4	1746	20551	10.81
混合粉	1160	4.96	1153	7936	12.76
浮山66.5品	1246	2.2	7662	14389	15.36
超特粉	1201	4.94	4211	7311	11.47
翼城65品	1312	5.71	3943	14682	8.11
摩卡粉	1228	5.31	1823	15520	9.41
托克粉	1349	4.81	5815	6125	7.17
曲沃64品	1212	4.61	4003	16195	7.62

冶金特性

试样名称	同化温度	液相流动性指数	黏结相强度	固相连晶强度	CF生成能力
铁粉硫酸渣	1184	12.37	2562	8479	7.57
混合粉	1236	4.51	1848	7939	5.52
浮山66.5品	1316	1.56	6097	16384	10.84
PB粉	1186	2.52	710	8382	8.52
摩卡粉	1207	5.28	1825	8362	10.14
超特粉	1201	3.35	1082	7032	6.95
翼城65品	1221	3.59	7246	24242	12.35
曲沃64品	1228	6.56	7849	18295	12.74
托克粉	1316	5.34	1298	9227	6.17

冶金特性

试样名称	同化温度	液相流动性指数	黏结相强度	固相连晶强度	CF生成能力
12#造堆料	1319	4.3	1448	6615	10.38
12#上机料	1259	4.82	1010	14607	10.47
铁粉硫酸渣	1254	5.49	2577	15223	7.14
高硅巴粗	1327	6.19	2993	4369	8.62
浮山66.5品	1255	1.03	10578	16798	12.17
翼城65品	1195	1.6	3969	18251	8.87
摩卡粉	1107	5.36	2047	11154	10.26
印度块沫	1266	10.21	880	7603	4.33
混合粉	1226	6.48	1035	10502	5.47

铁矿冶金特性

试样名称	同化温度	液相流动性指数	黏结相强度	固相连晶强度	CF生成能力
罗布河粉	1092	4.07	473	7799	14.76
曲沃精粉	1198	4.67	3690	9620	12.04
高硅巴粗	1341	5.55	456	5836	6.77
PB粉	1126	1.85	1445	13336	7.06
超特粉	1151	5.23	3318	9246	7.6
浮山65品	1259	1.37	960	17997	11.56
铁粉硫酸渣	1220	11.14	4899	17188	6.67
曲沃64品	1239	2.59	5583	10972	10.34
印度粉	1214	7.22	4574	13323	6.3

冶金特性

国 别	化学成分										
	铁矿粉名称	T _{Fe}	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	K ₂ O	Na ₂ O	LoI
巴 西	卡拉加斯	67.50	0.70	0.74	0.01	0.02	0.008	0.036	<0.01	<0.01	1.70
	依塔比拉	63.65	5.31	1.02	0.01	0.02	0.007	0.046	<0.01	<0.01	1.20
	标准烧结粉	66.00	3.65	0.70	0.03	0.03	0.005	0.026	0.008	0.005	0.80
	MBR CSF	67.00	1.50	1.25	0.12	0.06	0.007	0.044	<0.01	<0.01	1.30
	MBR SF3.5	66.00	3.39	0.81	0.076	0.06	0.01	0.033	<0.01	<0.01	1.39
澳 大 利 亚	哈默斯利	62.92	3.35	2.10	0.067	0.04	0.011	0.063	0.017	0.025	2.56
	纽 曼	62.08	2.82	1.43	0.070	0.10	0.011	0.046	0.02	0.023	4.60
	库利安诺宾	63.50	2.76	0.92	0.020	0.07	0.035	0.083	<0.01	<0.01	5.25
	戈德沃斯	64.68	4.72	1.71	0.072	0.05	0.01	0.057	0.017	0.015	3.60
	扬 迪	58.33	4.92	1.15	0.110	0.15	0.01	0.036	0.003	0.007	9.50
印 度	天普乐	63.00	2.75	2.25	0.050	0.050	0.10	0.05	—	—	4.29
	库得拉姆	65.4	3.04	0.49	0.84	0.17	0.05	0.029	0.01	0.011	1.10
	果 阿	62.50	4.20	2.10	0.60	0.05	0.01	0.02	0.017	—	3.80
	白 兰	64.50	2.75	2.48	0.02	0.10	0.01	0.05	0.035	—	2.40
	H 矿	67.85	0.96	1.02	0.01	0.01	0.008	0.063	—	—	1.05
南 非	伊斯科	65.00	4.00	1.35	0.10	0.04	0.010	0.06	0.333	0.022	0.70
	阿索曼	64.50	4.20	1.60	0.03	0.05	0.010	0.05	0.333	0.022	0.85
加 拿 大	卡罗尔湖	66.80	3.76	0.13	0.39	0.25	0.04	0.004	0.002	0.002	0.20

冶金特性

铁矿粉 名称	TFe %	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	CaO %	MgO %	S %	P %	K ₂ O %	LOI %	同 化 温 度 %	R=2.0, 1280 ℃ SFCA%	1280℃ 液相流 动性
麦 克 粉 (MAC)	63.13	4.27	1.38	0.49	0.08	0.001	0.047	—	5.20	—	24.5	0.374
	62.44	4.05	1.23	0.66	0.12	0.001	0.046	—	5.17	1233		
	61.50	3.42	2.20	0.20	0.10	0.034	0.070	0.014	6.00	1250		
皮 尔 巴 拉 粉 (PB)	62.52	4.70	2.22	0.20	0.20	0.016	0.078	—	4.35	—	35~40	1.498
	62.44	3.40	2.09	0.01	0.18	0.021	0.078	—	4.42	1233		
	61.96	3.72	1.83	0.05	0.11	0.019	0.085	—	5.60	—		
火 箭 粉 (FMG)	60.14	3.05	1.90	0.002	0.002	0.025	0.044	0.019	8.30	1145		1.795
	57.89	4.46	2.20	0.17	0.28	0.05	0.034	0.014	9.66	—		—
哈 粉 HIX	62.28	4.22	2.32	0.16	0.28	0.026	0.080	0.012	4.96	1233	39.3	0.498
哈 粉 HIY	58.35	4.85	1.26	0.20	0.30	0.021	0.038	0.008	10.16	1135		3.127
西 安 吉 拉斯粉	61.50	3.22	2.40	0.22	0.10	0.014	0.070	—	6.0	1260	—	0.372
	61.72	3.20	1.36	0.01	0.05	0.014	0.067	—	6.32	1238	—	0.372
委粉	63.70	2.70	1.15	0.03	0.06	0.02	0.08	0.016	—	1149	—	—
马 萨 杰 粉	56.56	5.88	2.60	0.13	0.25	0.038	0.019	—	9.6	1180	55.3	0.985
	57.38	5.60	2.65	0.24	0.24	0.019	0.038	0.014	9.26	1174	—	0.985
伊朗粉	66.0	2.40	0.50	0.91	1.85	0.90	0.05	0.036	—	—	—	—
	54.70	2.01	4.04	0.52	0.17	—	0.082	—	9.0	—	—	—
印尼粉	61.06	3.82	1.61	0.81	1.65	0.05	0.073	—	2.58	—	—	—

冶金特性

铁矿粉名称	化学成分特征	物理性能特征	烧结特征	烧结适宜配比
麦 克 粉 (MAC)	含铁品味 62%左右, SiO ₂ 和 Al ₂ O ₃ 含量适中, 有害杂质含量低, 结晶水含量中度 (5%~6%)	中 间 颗 粒 含 量 高 (-0.1mm 达 39%), 制粒效果偏差	同化温度中等, 液相流动性偏差, 烧结性能适中	在相同条件下, FMC 粉的烧结性能优于 FMG 粉, 比 PB 粉差, 适宜配比小于 25%
皮尔巴拉粉 (PB)	含铁品位 62%上下, SiO ₂ 和 Al ₂ O ₃ 含量稍高, S 含量低, P 含量偏高, 结晶水含量中度 (5%左右)	粒 度 较 粗 (MS=2~4mm) 有利于制粒和改善混合料透气性	同化温度和液相流动性适中, 烧结性能优于 HIX 粉, 优于 MAC 粉	烧结适宜配比为 25% 左右
火箭粉 (FMG)	含铁品位为 58~60%, 烧损值高 (LOI=8~10%) 有害杂质和 P 含量低	粒 度 较 粗 (MS=2.5mm) 矿物组织疏松多孔, 制粒性能偏差	同化温度低, 液相流动性好, 烧结热耗大, 有利于提高产量, 不利于强度改善	烧结适宜配比为小于 20%
哈粉	含铁品位中等, (62%±), Al ₂ O ₃ 含量高, P 含量高, 结晶水含量中等 (5%±)	中间颗粒含量大于 30%, 制粒效果不良	同化温度中等, 高于 HIY, 液相流动性偏小	适宜配比小于 20%
HIX	含铁品位低, Al ₂ O ₃ 含量低, 烧损值大于 10%	粒度组成较好, 制粒性能中度	同化温度低, 成品矿强度低	适宜配比 20%~25%
HIY	含铁品位低, Al ₂ O ₃ 含量高, 烧损值大于 9.5%, 含 S、p 有害杂质低。	粒度粗, 适宜于制粒, 烧结收缩率大	同化温度和粘结相强度低, 连晶固结能力较强	适宜配比 5%左右
马萨杰粉	含铁品位 62%左右, SiO ₂ 含量低, Al ₂ O ₃ 含量高, 低 S 高 P 矿粉, 烧损值, 6~7%	粒度偏细, 混合料透气性差	同化温度中度, 液相流动性差, 烧结燃耗高, 强度偏低	适宜配比小于 10%
西安吉拉斯粉	含铁品位高, SiO ₂ 含量低, S、P 有害杂质含量很低	粒度较粗, 表面形态不宜于制粒	烧结性能较好, 粘结相强度较高	适宜配比可根据成本和配矿作调整
委内瑞拉粉	含铁品位高, SiO ₂ 含量低, S 含量高且波动大	粒度细, 不利于制粒和改善混合料透气性	烧结料层透气性偏差, 烧结性能一般	适宜配比 10%左右
伊朗粉	含铁品位低, 小于 55%, Al ₂ O ₃ 含量高, 大于 4%, P 含量高, 烧损大于 9%	水分大、粘性大难以制粒	烧结热耗大, 透气性差, 烧结速度慢	适宜配比考虑低成本 5%~8%
印尼粉				

配矿影响-铁矿石种类1

天然铁矿石的种类和特征

用于高炉炼铁的铁矿石分天然铁矿和人造富矿两大类，常见并用于烧结球团和高炉炼铁生产的天然铁矿石又主要分四种，它们的分类和特征列于表1。

表1 天然铁矿石的种类及主要特征

铁矿石名称	化学分子式	理论含铁量	密度（t/m3）	颜色	实际含铁量	有害杂质	强度	还原性
磁铁矿石	Fe ₃ O ₄	72.4	5.2	黑色	45~70	S、P高	坚硬致密	低
赤铁矿石	Fe ₂ O ₃	70.0	4.9~5.3	红色	55~60	S、P低	易碎	高
褐铁矿石	mFe ₂ O ₃ nH ₂ O	60~66	3.0~5.0	黄褐色	37~55	S、P高低不等	疏松	高
菱铁矿	FeCO ₃	48.2	6.8	灰色带黄褐色	30~40	S低P高	易碎	易

褐铁矿的分子式有：Fe₂O₃·H₂O，2Fe₂O₃·H₂O，2Fe₂O₃·3H₂O，3Fe₂O₃·4H₂O。

配矿影响-铁矿石种类2

1) 烧结矿：烧结矿按碱度（ CaO/SiO_2 ）可分为四种，它们的主要特征列于表2

表2 烧结矿的种类及特征

名称	CaO/SiO_2	主要粘结相	主要冶金性能
酸性烧结矿	自然碱度~0.8	$\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$	难还原，软熔温度低
自熔性烧结矿	1.0~1.5	$\text{CaO}\cdot\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$	还原由难随碱度提高
高碱度烧结矿	1.8~2.5	$\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	还原性好，软熔性能优良
超高碱度烧结矿	>2.50	$\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	冶金性能会略有下降

2) 球团矿：球团矿有酸性球团矿（碱度由自然碱度到0.3）和熔剂性球团矿（碱度 ≥ 0.8 ），它们的矿物组成主要为 Fe_2O_3 和 $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，冶金性能随碱度提高有所改善，酸性球团矿的冶金性能稍差。

配矿影响-铁矿石质量1

铁矿石的质量由化学成分、物理性能和冶金性能三个部分组成，它们三者之间的关系化学成分是基础，物理性能是保证，冶金性能是关键。

1-3-1、铁矿石化学成分：

铁矿石的化学成分由含铁元素、脉石和有害杂质三部分组成。

- 1) 有价成分： Fe (Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 、 FeO 、 FeCO_3 ， CaO ， $\text{MgO}(\text{B}_2\text{O}_3)$);
- 2) 负价成分（酸性脉石）： SiO_2 、 Al_2O_3 ;
- 3) 有害杂质： S 、 P 、 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 、 Pb 、 Zn 、 Cu 、 As 、 Cl 、 (TiO_2) 。

高炉炼铁对铁矿石有害杂质的限量要求列于表3

表3 铁矿石有害杂质限量要求(%)

有害元素	S	P	$\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$	Pb	Zn	Cu	As	Cl	(TiO_2)
限量要求	≤ 0.3	≤ 0.05 — 0.12	≤ 0.20	≤ 0.10	≤ 0.10	≤ 0.20	≤ 0.07	≤ 0.001	≤ 0.5

配矿影响-铁矿石质量2

铁矿石的物理性能包括粒度和粒度组成，强度和热爆裂指数，对块铁矿和球团矿的物理性能要求列于表4.

表4 对块铁矿和球团矿的物理性能要求

矿种	转鼓指数 (Ti+6.3mm%)	热爆裂指数 (Di-6.3mm%)	粒度和粒度组成 (+31.5mm%) (-6.3mm%) ,	
块铁矿	≥85.0	≤5.0	≤5.0	≤5.0
球团矿	≥90.0	—	(+15mm%) (-5.0mm%)	
			≤5.0	≤5.0

对用于烧结和球团生产的粉矿要求粒度：+8mm≤5%，+0.25—1.0mm的准颗粒≤22.0%；对用于球团矿生产的铁精粉要求粒度-0.074mm≥82%,比表面积≥1350cm²。

配矿影响-铁矿石质量3

铁矿石的冶金性能包括900℃的还原性（RI），500℃低温还原粉化指数（RDI+3.15），球团矿的还原膨胀指数（RSI）对块铁矿和球团矿的冶金性能要求列于表5.

表5 对块铁矿和球团矿的冶金性能要求

矿种	900℃还原性 (RI %)	500℃低温还原粉化 (RDI+3.15%)	900℃还原膨胀指数 (RSI %)
块铁矿	≥65.0	≥72	—
球团矿	≥65.0	≥72	≤20.0

对粉矿虽然没有冶金性能的要求，买方可根据已掌握的各种铁矿粉的烧结基础特性（同化性、粘结相强度、液相流动性、生成铁酸钙能力和固相连晶能力）或烧结反应性（利用系数和强度是反映烧结反应性的主要指标）去衡量它们的质量状况。

配矿影响-成本优化

1、吨度排名

料种	TFe	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	H ₂ O	到厂价	干基价	有效品位	四元吨度	排名	备注
南非精粉	63.5	1.2	1.5	3.3	0.8	7	630	678.2	64.9	10.45	1	
巴西混合	62.0	6.0	0.31	0.2	1.6	7.5	620	668.5	48.7	13.72	2	
PB粉	61.3	3.7	0.02	0.21	2.40	8.0	650	705.0	50.2	14.06	3	
杨迪粉	57.0	6	0.02	0.17	1.70	8.0	590	641.3	44.9	14.27	4	
纽曼粉	61.5	4.0	0.2	0.35	2.5	7.5	690	742.7	49.8	14.91	5	
氧化铁皮	66.5	2.8	3	0.8	2.1		不详					
合计												

$$TFe<综粉>=TFe/(1-LOI) \times [100+2R2(SiO_2+Al_2O_3)/(1-LOI)-2(CaO+MgO)/(1-LOI)+2(S+P)/(1-LOI)+5 \times (K_2O+Na_2O+Pb+Zn+Cu+As+CL)/(1-LOI)]-1 \times 100\%$$
。式中，R2为炉渣二元碱度，其余均为铁矿粉的化学成分，LOI为烧损值。

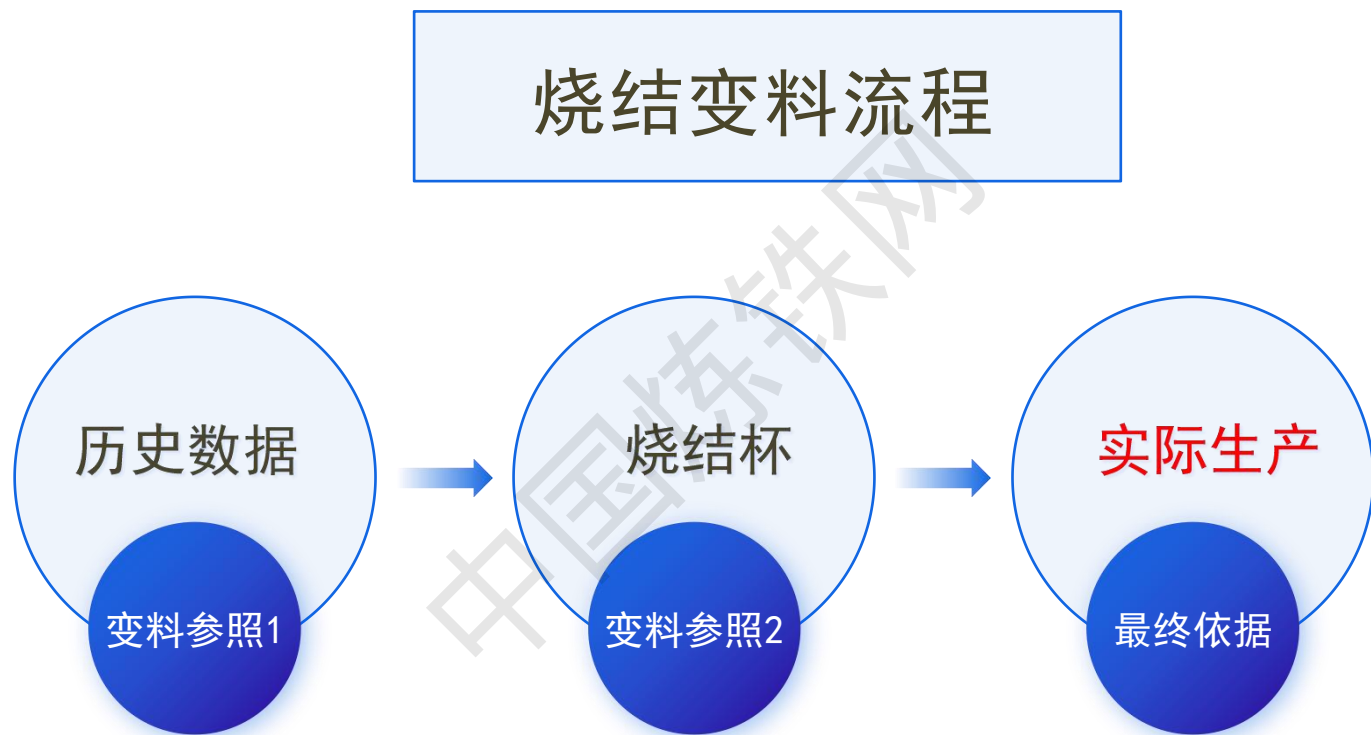
配矿影响-成本优化

2、成本核算

原料结构	Pb粉	纽/麦粉	杨迪粉	巴西混合	南非精粉	氧化铁皮	杂料	返矿	白灰	白云石	焦沫
当前结构	20	13	0	13	9	6	9	17.5	3.8	5.5	3.2
优化结构1	18	0	14.8	10	14	6	9	17.5	4.7	3.0	3.0

原料结构	烧结矿指标				铁水指标			综合效益			
	TFe	SiO2	Al2O3	MgO	TFe综合	矿耗	能耗	铁成本	铁产量	铁利润	日产铁利润
当前结构	57.5	4.72	2.14	2.75	56.5	1.681	532	3075	5700	25	14.2万
优化结构1	58.0	4.65	1.93	2.58	56.6	1.678	531	3068	5700	32	18.2万

配矿影响-烧结产量、质量



配矿影响-烧结产量



配矿影响-SiO₂

- 不同SiO₂含量对烧结冶金性能的影响

通过配加高硅矿粉来改变烧结矿的SiO₂含量，SiO₂含量设定目标值见表1

表1

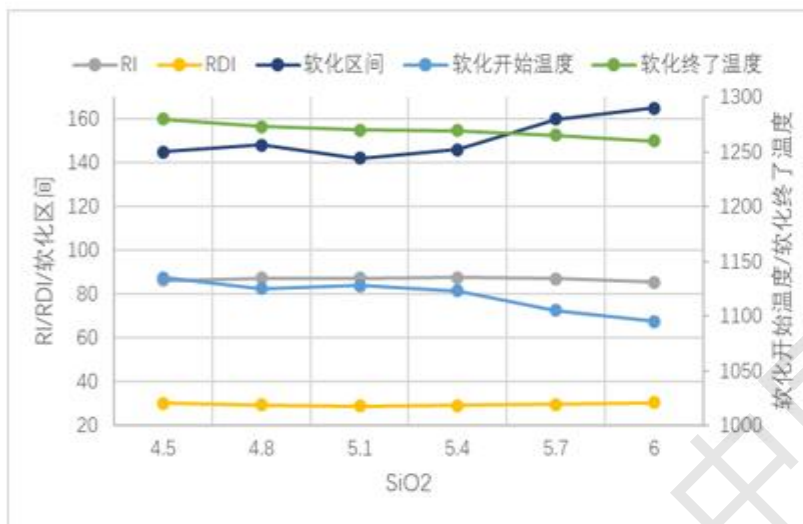
序号	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	4.5	4.8	5.1	5.4	5.7	6.0

表2 SiO₂含量对烧结矿冶金性能的影响试验结果

序号	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	4.45	4.81	5.15	5.38	5.72	5.96
TI(%)	64.67	65.67	66.67	67.33	67.67	67.33
成品率	72.52	79.96	81.63	82.56	82.08	81.62
RI	86.19	88.36	88.26	87.54	86.98	85.56
RDI _{-3.15mm}	30.24	29.55	28.93	29.03	29.81	30.63
软化开始温度	1135	1129	1128	1123	1105	1095
软化终了温度	1280	1273	1270	1268	1265	1260
软化区间	145	144	142	145	160	165

配矿影响-SiO₂

● SiO₂含量



RI: 烧结矿的SiO₂含量增加到4.8%以上到5.3%时, CF和液相形成较丰富, 烧结矿中孔隙率较高, 使得还原度增加; 继续增加SiO₂含量, 烧结矿中硅酸钙增加, 使得CF量减少, 还原度受到影响。

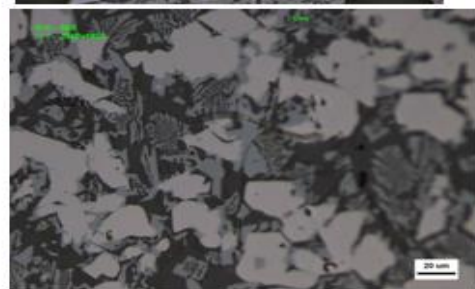
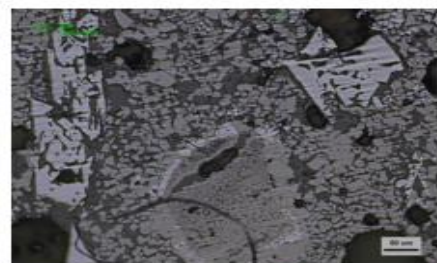
RDI-3.15mm: 随着烧结矿SiO₂含量的变化, 呈现先降低后增加的趋势。

软化性能: 随着烧结SiO₂含量增加, 烧结矿的软化开始温度呈降低趋势, 软化终了温度也呈降低趋势, SiO₂含量大于5.5%, 软化区间超过了150°C。

综合考虑烧结矿SiO₂含量对各项冶金性能指标的影响, 得出烧结矿的适宜SiO₂含量为4.8—5.3%。

配矿影响-SiO₂

液相量少，铁矿物含量较高，强度较差，入炉抗冲击能力弱

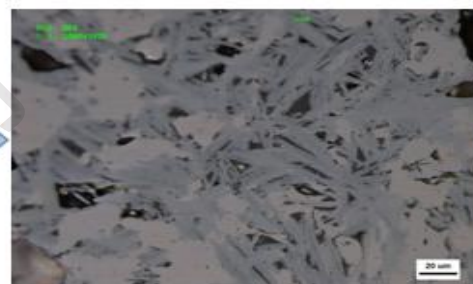


钙铁橄榄石、玻璃质含量高，强度、还原度要变差

SiO₂=4.45%



SiO₂=4.8%



SiO₂=5.35%



SiO₂=5.15%



SiO₂=5.96%

注：白色—赤铁矿 灰白色—磁铁矿 兰灰色—CF 灰黑色—硅酸盐 黑色—孔洞

SiO₂从低到高，橄榄石类液相量由少到多，硅酸钙增加，强度和还原性较好的CF粘结相量减少。

配矿影响-Al₂O₃

三

Al₂O₃在烧结、炼铁中的作用:



铝的作用

复合铁酸钙与Al₂O₃的关系:

- 1、SFCA=CaO·SiO₂-CaO·3(Fe、Al)₂O₃
- 2、液相粘度决定SFCA的形成, 液相粘度由网络形成剂(Al₂O₃)和网络调节剂(MgO)决定。

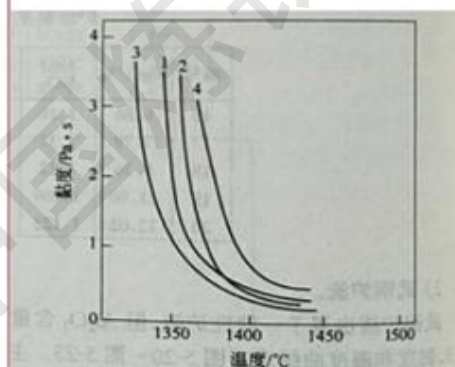


图 5-23 不同 Al₂O₃ 含量时的温度与粘度曲线
曲线 1~4 的 Al₂O₃ 含量
分别为 10%、12%、14%、17%

以上曲线取自《高炉炼铁生产技术手册》

表 4-5 Al₂O₃ 含量与复合铁酸钙生成量的关系

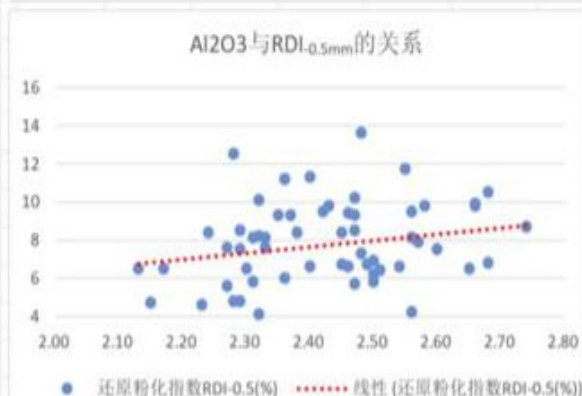
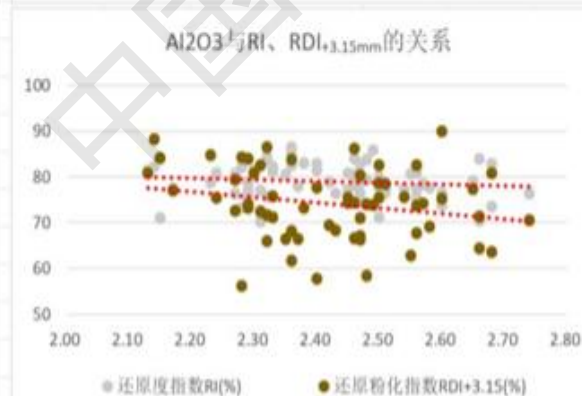
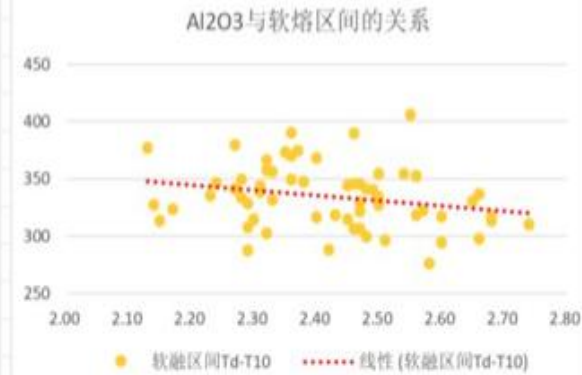
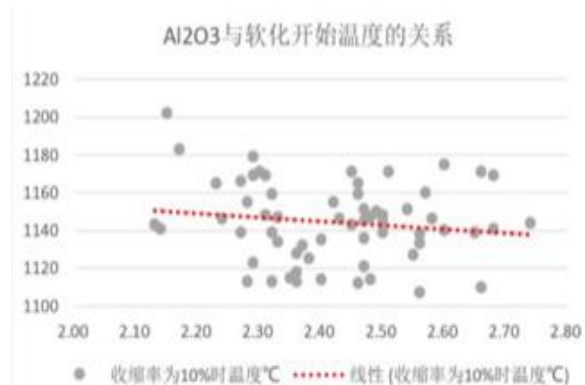
温度/℃	碱度	Al ₂ O ₃ /SiO ₂ /%	复合铁酸钙生成量/%	保温时间/min
1250	1.5	0.2	0	1
1250	1.5	0.5	10	2
1250	1.5	0.8	24	2
		0.8	26	4
		0.8	18	0
1250	2	0.2	1	2
	2	0.2	3	4
		0.5	20	0
		0.5	30	2
		0.5	43	4
1250	2	0.8	40	0
		0.8	50	2
		0.8	52	4

以上图片摘自——《铁矿烧结优化配矿原理与技术》范晓蓉著

Al₂O₃对高炉炉渣的影响:

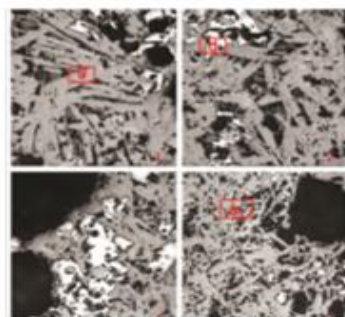
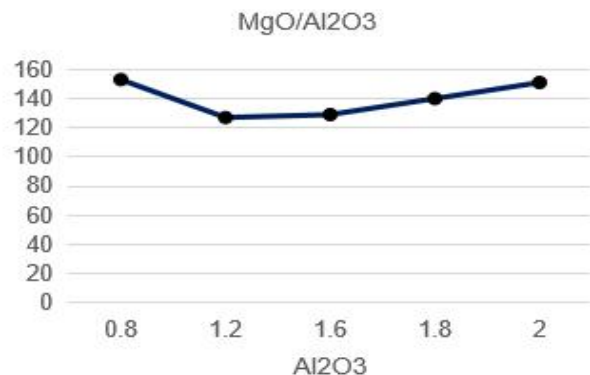
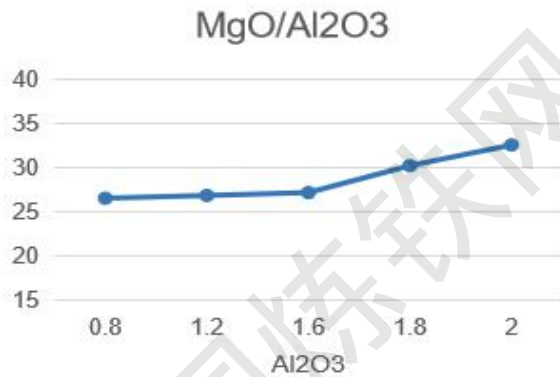
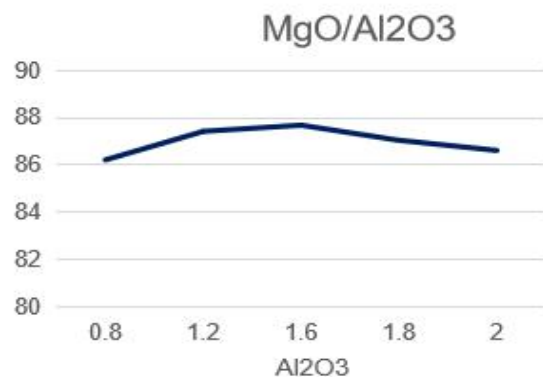
- 1、高铝会造成炉渣粘度高, 不利于脱硫。
- 2、合适的铝含量有利于稳定炉渣的。若炉渣中 Al₂O₃ 含量低于 6%~ 7%, 将导致炉渣的稳定性变差, 即碱度或成分的微小变化可能导致炉渣粘度的急剧提高, 影响高炉正常生产; 当 Al₂O₃ 含量为 7%~ 15% 时, 炉渣粘度处于较低的区域, 受成份及含量变化的影响小, 炉渣稳定性好。

配矿影响-AI₂O₃

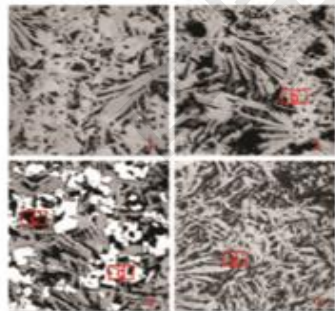


配矿影响-Al₂O₃

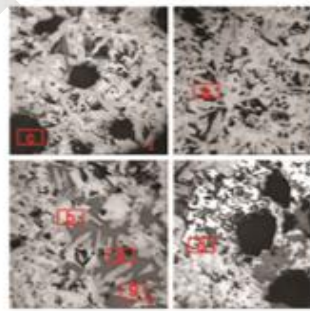
● Al₂O₃含量



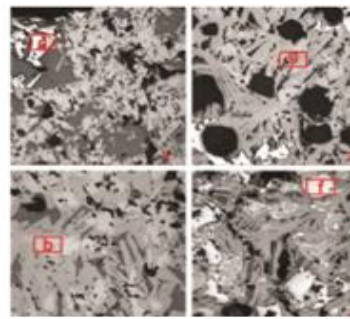
Al₂O₃=0.8



Al₂O₃=1.2



Al₂O₃=1.6



Al₂O₃=1.8

注：
白色—赤铁矿
灰白色—磁铁矿
兰灰色—CF
灰黑色—硅酸盐
黑色—孔洞

Al₂O₃含量为1.2—1.6%时，有助于复合铁酸钙的生成，烧结矿显微结构理想，对烧结矿的性能起到一定的保障作用。即适宜Al₂O₃含量为1.2—1.6%

配矿影响-MgO影响

MgO—对高铝渣流动性有利

增加MgO，炉渣的黏度和熔化温度均会降低，且稳定性增强。
但MgO过高时，会产生短渣。

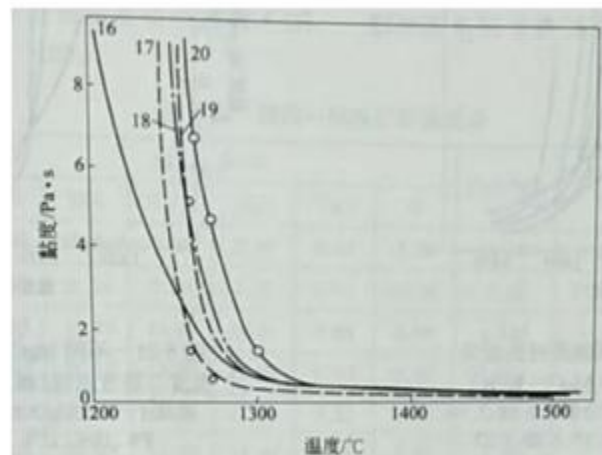


图 5-19 碱度基本不变,用 MgO 代替 CaO 时
炉渣黏度与温度的关系

编号	MgO/%	CaO SiO ₂	MgO+CaO SiO ₂	CaO/%	SiO ₂ /%
16	6.86	1.10	1.28	42.66	38.78
17	7.79	1.12	1.326	42.58	37.98
18	9.36	1.12	1.337	41.16	36.66
19	11.90	1.069	1.425	39.59	36.10
20	12.02	1.125	1.47	39.22	34.86

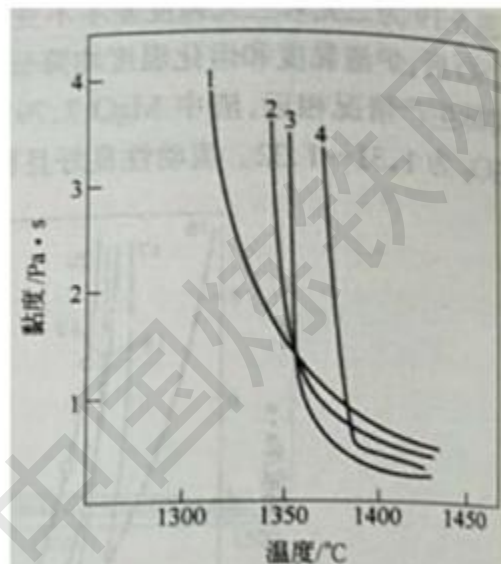


图 5-21 不同 MgO 含量时的
温度与黏度曲线(碱度为 1.05)
曲线 1~4 的 MgO 含量分别为
8%、10%、12%、14%

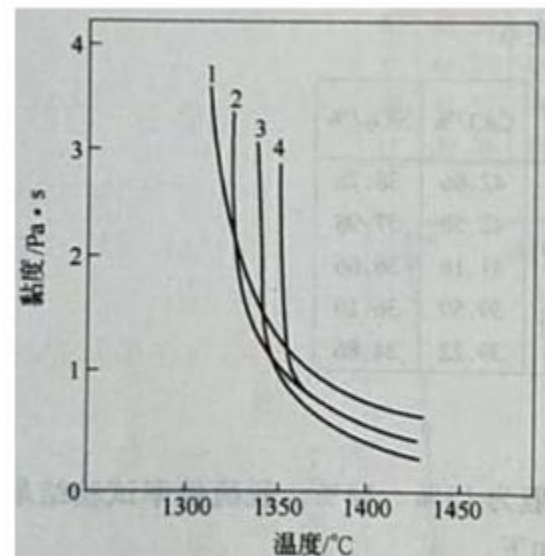


图 5-22 不同 MgO 含量时的温度
与黏度曲线(碱度为 1.00)
曲线 1~4 的 MgO 含量分别为
8%、10%、12%、14%

配矿影响-MgO影响

MgO—对烧结指标不利，但在液相中的MgO超过3%后对液相和铁酸钙的生成影响程度减小

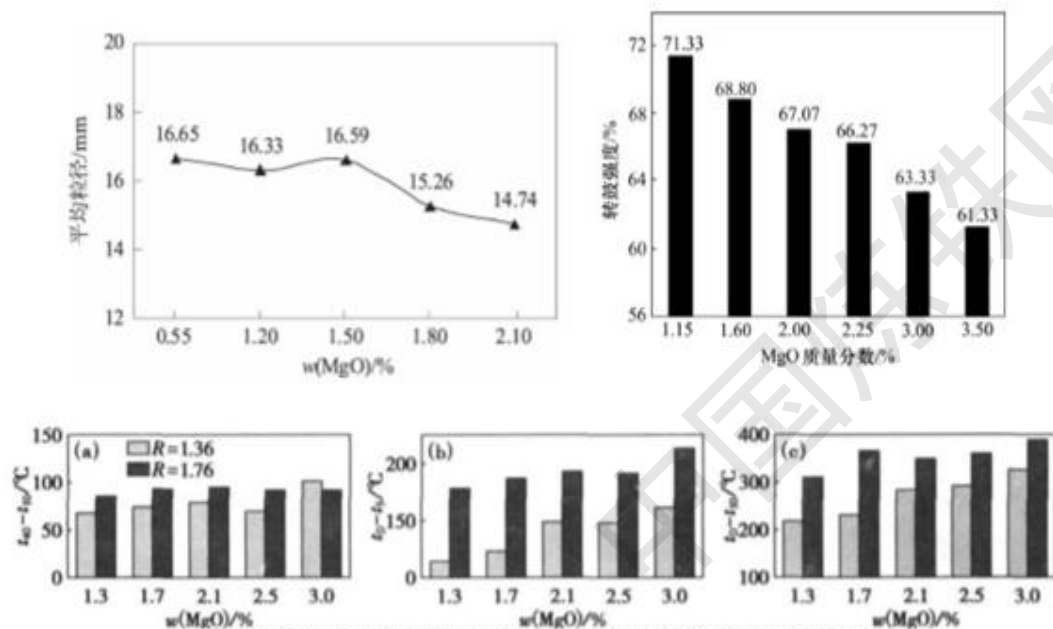


图2 MgO含量对烧结矿软化区间、熔化区间及软熔带温度区间的影响

以上图片摘自《MgO含量合理配置对综合炉料熔滴特征及形成初渣特性的影响》张开发、吴胜利等 科学技术与工程2015年5月

建议:

- 1、球团矿增镁。
- 2、炉渣的MgO在8~11%较合适，炉渣的铝含量不要超过17%。

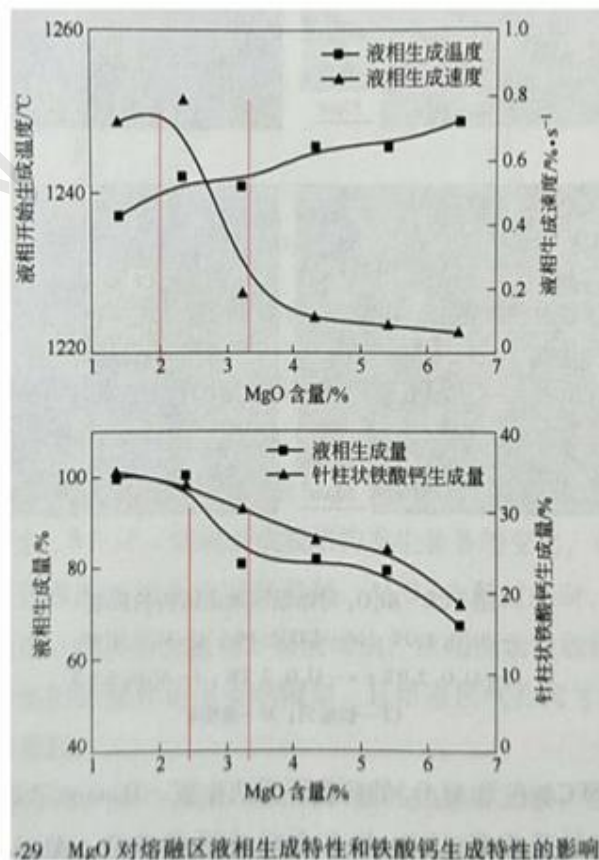
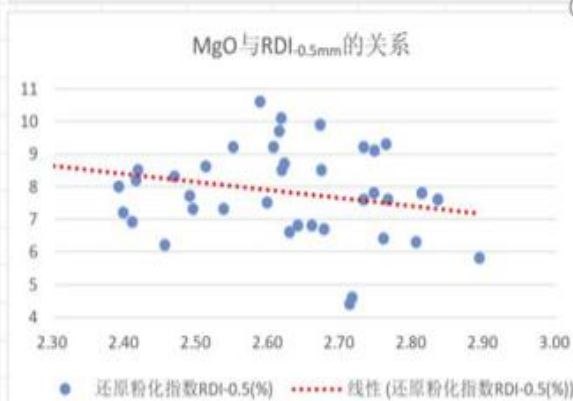
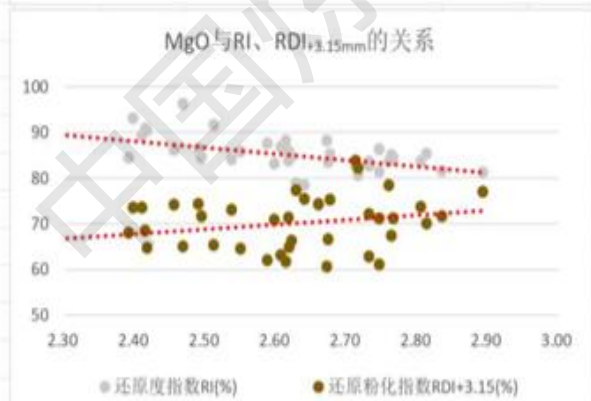
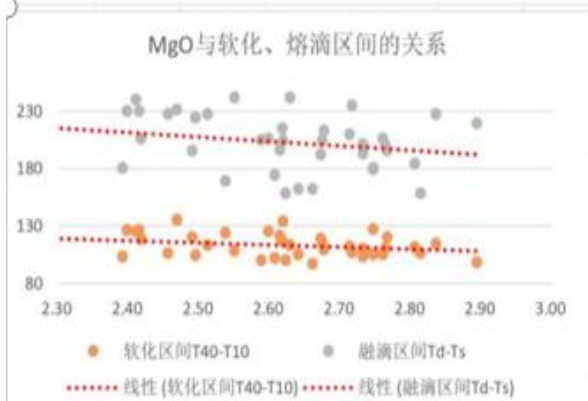
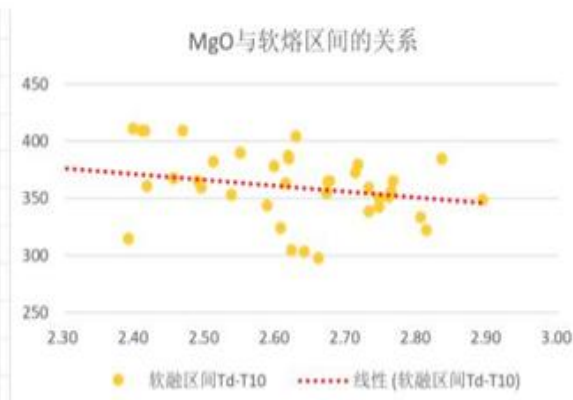
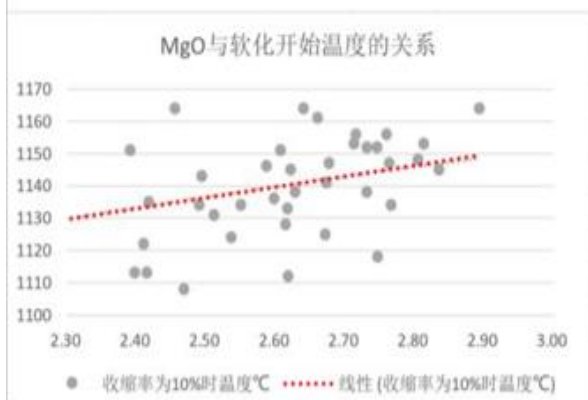


图29 MgO对熔融区液相生成特性和铁酸钙生成特性的影响

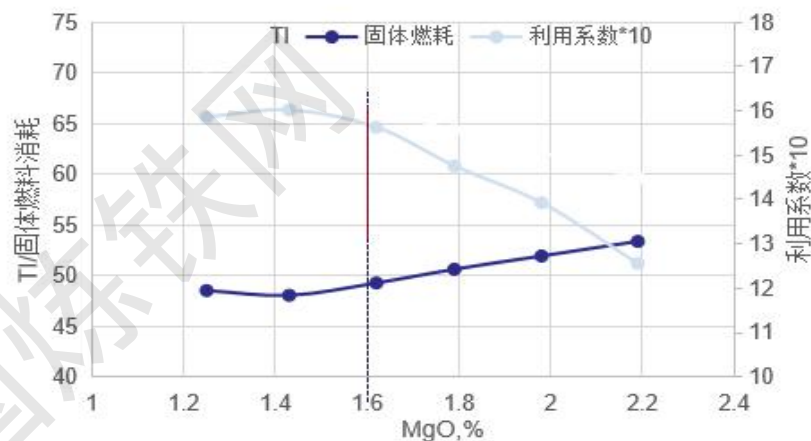
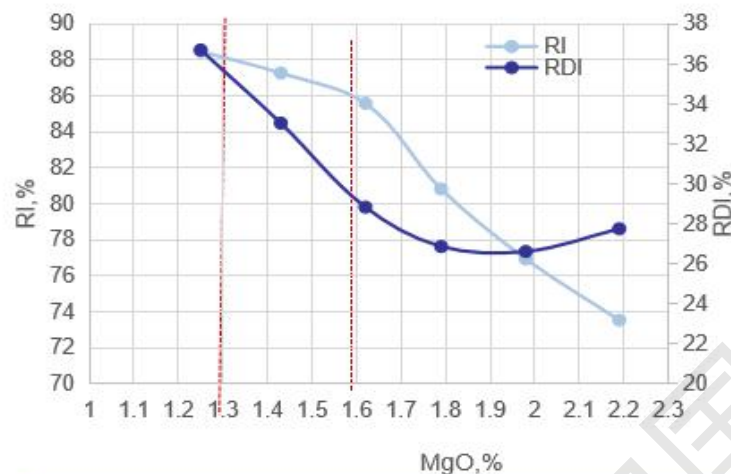
以上图片摘自——《铁矿烧结优化配矿原理与技术》范晓慧著

配矿影响-MgO影响



配矿影响-MgO影响

● MgO含量



- 随着MgO的增加，还原度基本呈直线下降趋势，MgO含量超过1.6以后，RI小于86%，这于烧结矿冶炼性能不利。
- MgO在1.3%以下时， $RDI_{-3.15mm}$ 超过了35%。
- 随着MgO的增加，转鼓强度呈直线下降趋势，MgO含量超过1.6以后，转鼓强度小于67%，MgO超过1.6%，固体燃料消耗超过48kg/t。
- 综合考虑，冶金性能与技术经济指标，MgO以小于1.6%为佳。

配矿影响-MgO影响

- MgO含量

软化
性能

MgO	T4	T10	T40	ΔT_{4-40}
1.23	1077	1123	1240.7	163.7
1.41	1109.3	1124	1253	143.7
1.62	1114.5	1143	1259	144.5
1.84	1120	1167	1270.5	150.5

- MgO含量从1.2-1.8%，随着MgO含量的增加，烧结矿的开始软化温度提高，软化终了温度也提高，软化区间呈凹型。

配矿影响-MgO影响

矿物组成与显微结构均发生变化，致冶金性能变差。

MgO=1.2



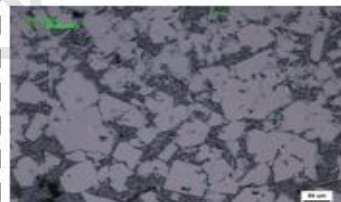
MgO=1.4



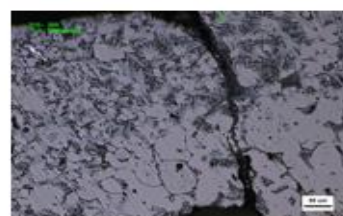
MgO=1.6



MgO=1.8



MgO=2.2



注：白色—赤铁矿 灰白色—磁铁矿 兰灰色—CF 灰黑色—硅酸盐 黑色—孔洞

MgO	Fe ₃ O ₄	Fe ₂ O ₃	C. F	C ₂ S	硅酸盐、玻璃质	熔剂夹生
1.23	42.5	12	38	3.5	6	0
1.41	43.8	8	35.8	4.6	7.8	0
1.62	47.6	6.3	31.2	5	9.9	0
1.84	50.5	5.5	26.8	7.6	9.6	微
2.19	53.5	7.5	22.1	6.8	10.1	少量

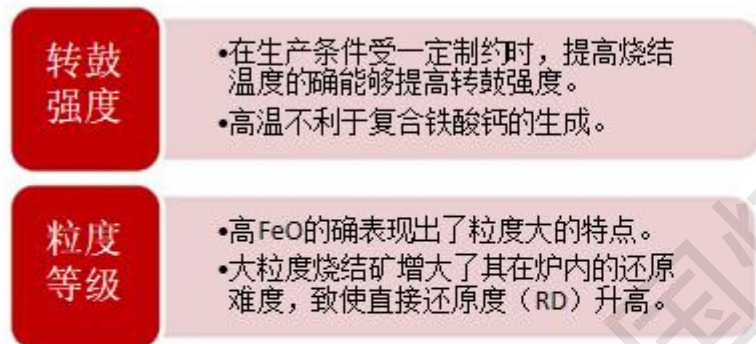
综合考虑烧结矿MgO含量对各项冶金性能指标的影响，得出烧结矿的适宜

配矿影响-FeO影响

1、烧结矿FeO形成的机理

烧结过程中碳与氧不充分燃烧引起的还原性气氛，导致部分高价铁被还原成FeO，烧结过程中配碳量超高，烧结温度就越高，同时还原性气氛也越强、FeO含量越高。这与高炉焦比、炉温和铁水硅含量三者的关系相似。

2、高FeO对烧结矿质量的影响



3、烧结矿FeO的控制方向

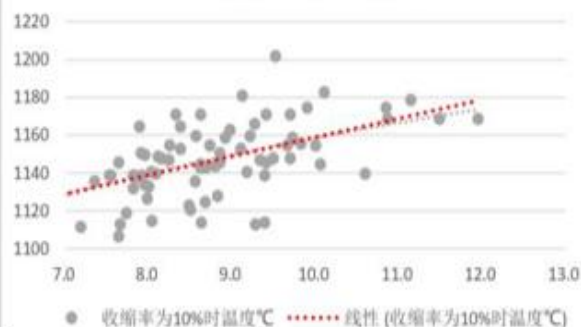
低FeO更有利于降低烧结燃料消耗、高炉焦比，因此出于节能减排的需要，降低烧结矿FeO是大趋势。

4、降低烧结矿FeO的策略

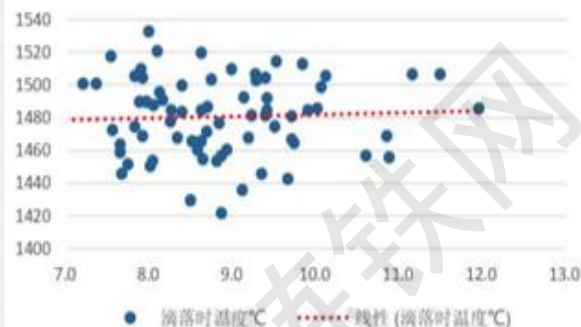
- 人员技术培训：提高现场操作人员的技术水平、增强责任心；
- 装备能力提升：增大烧结机面积，降低漏风率，降低设备故障率，稳定烧结原料、燃料质量；
- 调整铁矿性能：保持烧结料较低的同化温度和液相生成量，保持较合适的SiO₂含量和较高的碱度；
- 烧结操控规范：适当降低烧结速度，降低混合料水分，减小燃料粒度，严格控制终点温度。

配矿影响-FeO影响

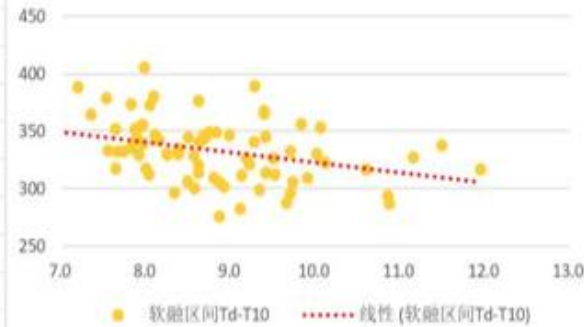
FeO与软化开始温度的关系



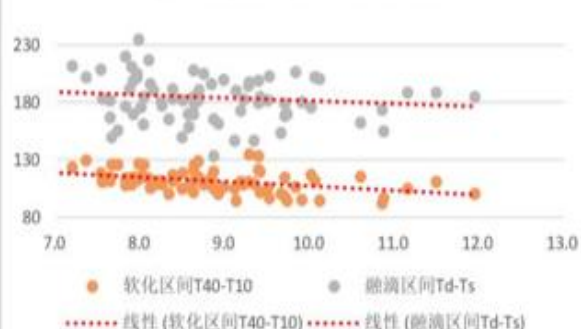
FeO与滴落温度的关系



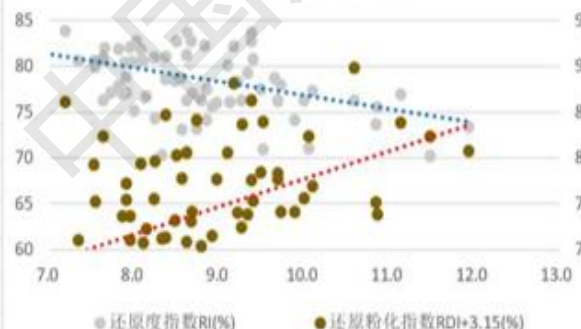
FeO与软熔区间的关系



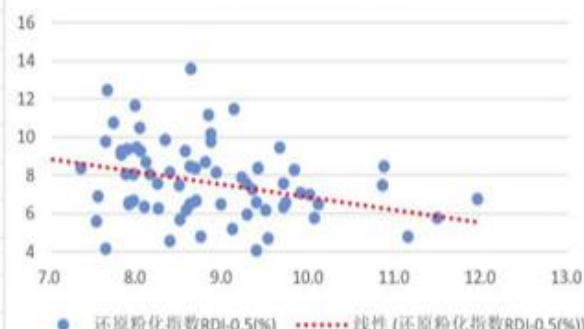
FeO与软化、熔滴区间的关系



FeO与RI、RDI_{3.15mm}的关系

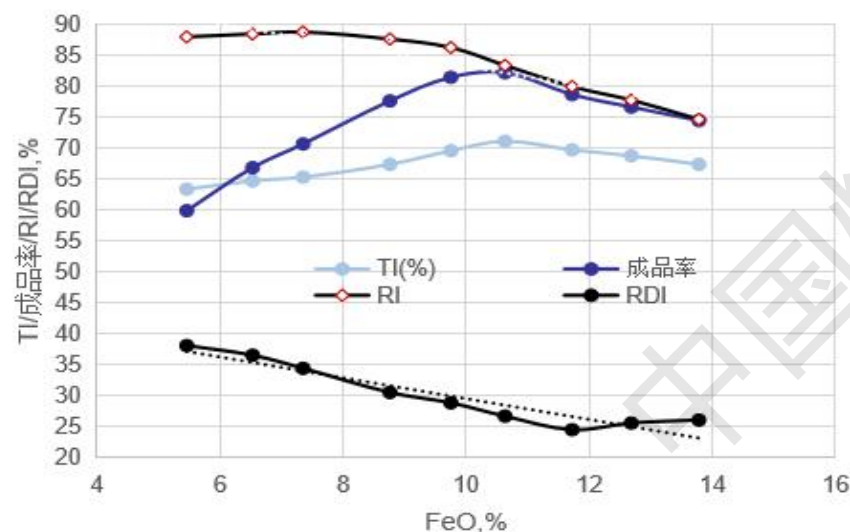


FeO与RDI_{0.5mm}的关系



配矿影响-FeO影响

● FeO含量



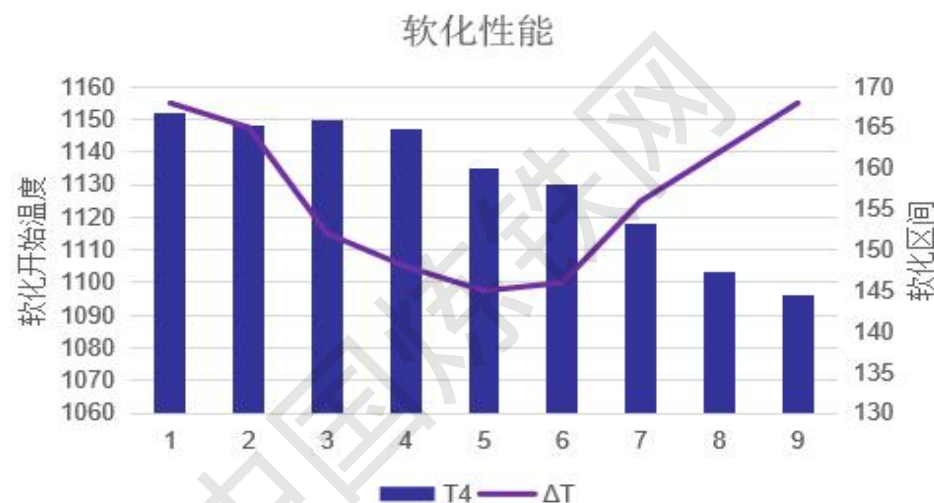
随着FeO含量的增加，烧结矿的还原度呈下降趋势，在FeO大于9.75%以后，还原度的下降幅度增大。FeO含量大于9.5%，还原度小于86%，处于较低水平。

随着FeO含量的增加，低温还原粉化率先呈下降趋势，FeO增加到12%以上时，低温还原粉化率又呈上升趋势。在FeO含量控制在8.7%以上时，低温还原粉化率小于30%，为较好水平。

综合考虑质量和性能指标，FeO的适宜值为8.5—9.7%。

配矿影响-FeO影响

● FeO含量

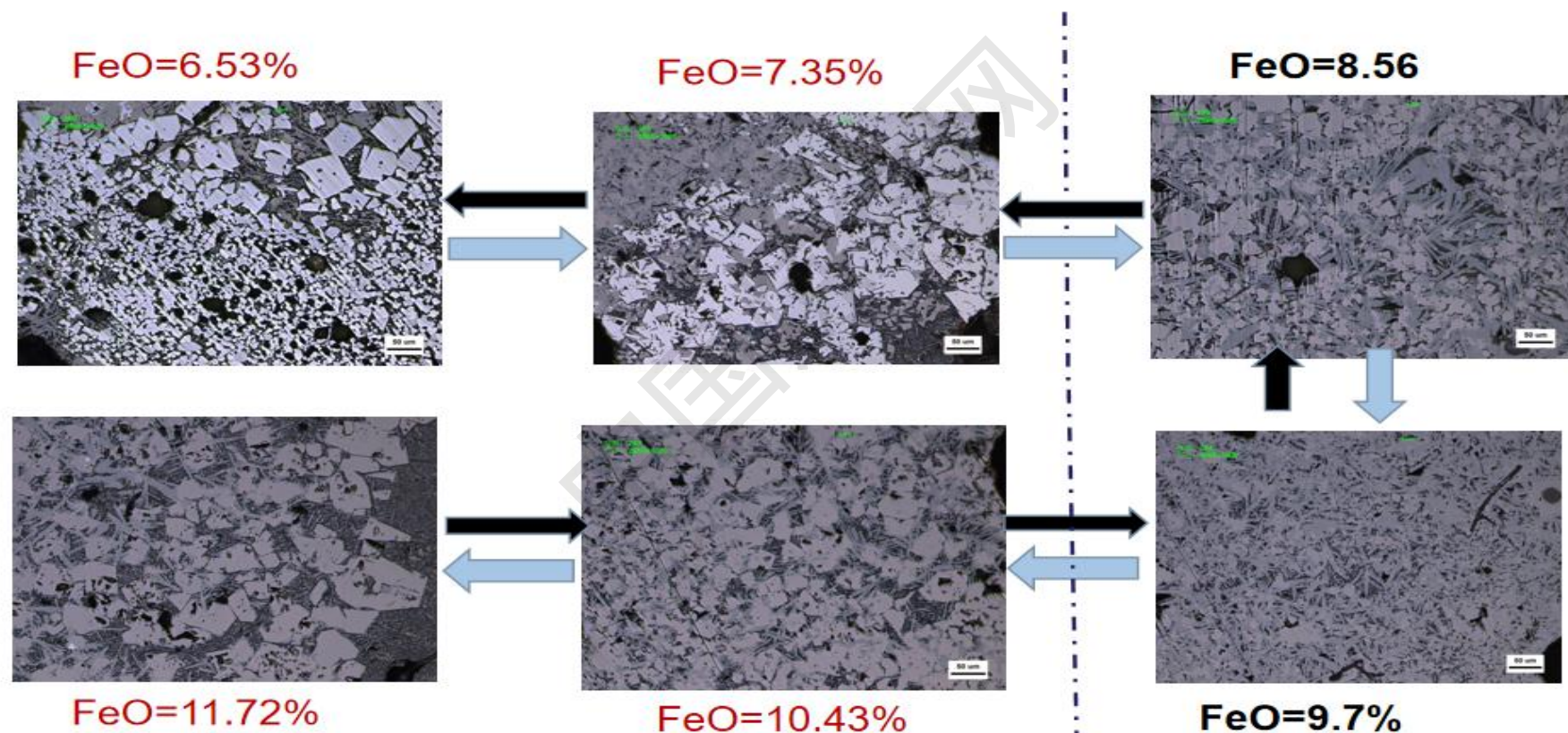


随着FeO含量的增加，粘结相由以CF为主转变为以硅酸盐为主，使得开始软化温度大致呈下降趋势，软化区间呈凹型。在FeO含量为8%以上，10.5%以下时，软化区间小于150℃

综合考虑质量和性能指标，FeO的适宜值为8.5—9.7%。

配矿影响-FeO影响

粘结相种类及品质发生了变化 → 冶金性能变化



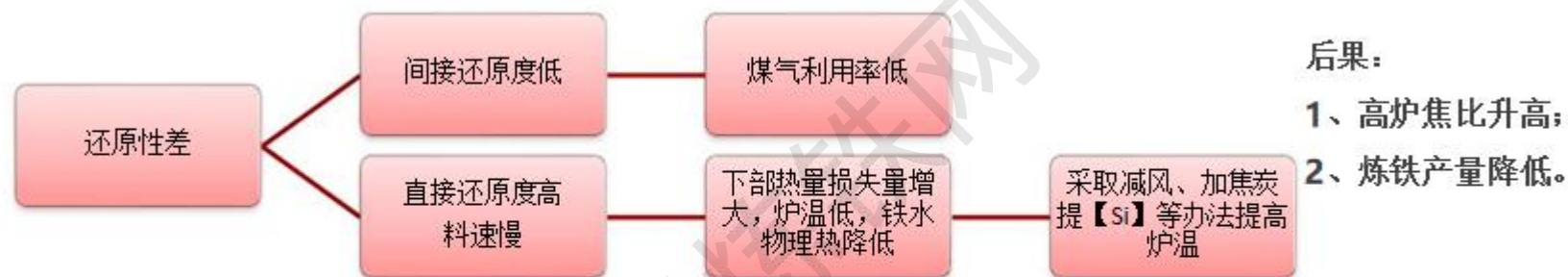
注：白色—赤铁矿 灰白色—磁铁矿 兰灰色—CF 灰黑色—硅酸盐 黑色—孔洞

还原度降低、软化开始温度降低

低温还原粉化加剧

配矿影响-冶金性能

还原性低都带来了什么后果？



还原性不良的烧结矿由于低熔点硅酸盐的存在，会造成烧结矿的软熔性能变差，从而影响高炉软熔带的透气性。还原性不良的烧结矿装入高炉后，会明显影响高炉上部的煤气利用率，使高炉内间接还原降低，直接还原（RD）比例升高，影响高炉燃料比和产量。据统计，入炉矿的间接还原降低10%，将影响高炉焦比8~9kg/t。——《铁矿石优化配矿实用技术》-许满兴、张天启编注

配矿影响-冶金性能

冶金性能影响因素

原料结构

- 配用卡粉
- 提高进口矿配比

化学成分

- FeO含量
- SiO_2 含量
- MgO含量
- Al_2O_3 含量
- R

工艺条件

- 料层厚度
- 强混
- 富氧热风

配矿影响-冶金性能

如何改善烧结矿还原性 (RI) ?

矿物名称	还原度/%			
	在氢气中还原 20 min		在 CO 气中还原 40 min	
	700℃	800℃	900℃	850℃
赤铁矿	91.5	—	—	49.4
磁铁矿	95.5	—	—	25.5
铁橄榄石	2.7	3.7	14.1	5.1
钙铁橄榄石 $(Ca, Mg)_x(FeO)_{2-x}SiO_2$				
$x = 1.10$	3.9	7.7	14.9	12.8
$x = 1.20$	—	—	—	12.1
$x = 1.3$	—	—	—	9.4
$(Ca, Mg)O \cdot FeO \cdot SiO_2$	5.5	10.1	18.4	—
$CaO/MgO = 5$				
$(Ca, Mg)O \cdot FeO \cdot SiO_2$	4.8	6.2	14.1	—
$CaO/MgO = 3.5$				
$CaO \cdot FeO \cdot 2SiO_2$	0.1	0.1	0.1	—
$2CaO \cdot FeO \cdot 2SiO_2$	0.1	0.1	6.8	—

$2CaO \cdot Fe_2O_3$	20.6	83.7	95.8	25.5
$CaO \cdot Fe_2O_3$	76.4	96.4	100.1	49.2
$CaO \cdot 2Fe_2O_3$	—	—	—	58.4
$CaO \cdot FeO \cdot Fe_2O_3$	—	—	—	51.4
$3CaO \cdot FeO \cdot 7Fe_2O_3$	—	—	—	59.6
$CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2Fe_2O_3$	—	—	—	57.3
$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	—	—	—	23.4

表 4-7 烧结过程中随含碳量增加烧结矿气孔度、还原性的变化

烧结矿的配碳量/%	烧结矿的气孔度/%	还原率/%
4	44.25	52.51
5	42.95	51.42
6	41.81	50.40
7	40.47	47.50
8	33.14	42.90
9	25.55	39.30
10	24.20	34.80

表 4-8 烧结矿原料中配碳量与铁橄榄石及还原率的关系

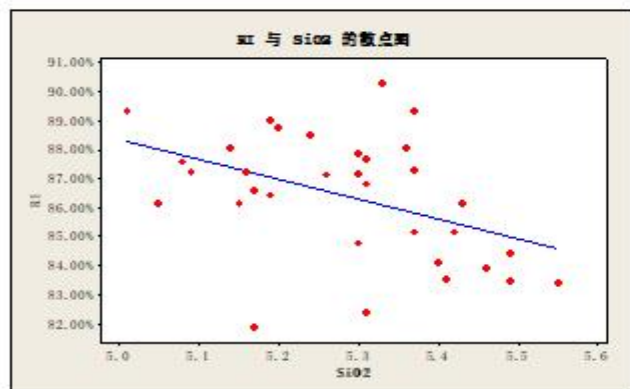
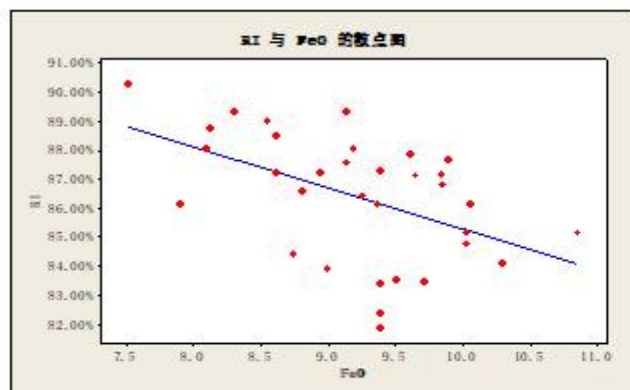
配碳量/%	铁橄榄石含量是/%	在 21 min 下的还原率/%
3.1	0.80	95.6
4.1	2.10	92.5
5.1	4.50	90.1
6.1	10.20	77.2
11.1	16.50	65.3

改善还原性 (RI) 的措施:

- ✓ 增加赤铁矿量
- ✓ 增加针状铁酸钙生成量
- ✓ 增大孔隙率
- ✓ 增加“多孔未熔矿石”
- ✓ 减少铁橄榄石

配矿影响-冶金性能

● FeO, R, SiO₂对RI的影响:



回归分析:RI 与 FeO, SiO₂, R

回归方程为

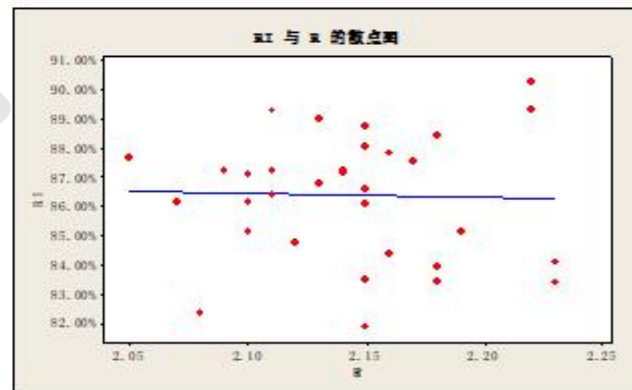
$$RI = 1.33 - 0.0127 \text{ FeO} - 0.0529 \text{ SiO}_2 - 0.0318 R$$

自变量	系数	系数标准误	T	P
常量	1.3283	0.1872	7.09	0.000
FeO	-0.012664	0.004519	-2.80	0.009
SiO ₂	-0.05292	0.02406	-2.20	0.036
R	-0.03182	0.07319	-0.43	0.667

S = 0.0179546 R-Sq = 36.5% R-Sq (调整) = 29.9%

方差分析

来源	自由度	SS	MS	F	P
回归	3	0.0053660	0.0017887	5.55	0.004
残差误差	29	0.0093487	0.0003224		
合计	32	0.0147146			



通过回归分析，得出FeO与SiO₂对烧结矿RI呈负线性影响，R的影响不显著(R为2.02~2.25)。

配矿影响-冶金性能

如何改善烧结矿低温还原粉化指数(RDI) ?

表 4-2 散晶 Fe_2O_3 形成与燃料用量、碱度大小的关系

编号	碱度 R	燃料/%	散晶 Fe_2O_3 /%	低温粉化/% (-0.5 mm)
1	1.8	5.5	3.2	8.1
2	1.6	5.5	5.3	10.1
3	1.4	6.1	5.8	11.4
4	1.2	6.1	6.4	12.6
5	1.1	6.5	11.5	25.3
6	1.1	6.5	13.2	28.1



图 4-33 5# 烧结矿中 Fe_2O_3 为主的固相结构
 Fe_2O_3 —浅白色, 互联状; Fe_3O_4 —灰黄色, 粒状; Mn 铁孔洞—黑色, 不规则; 反光 200 ×

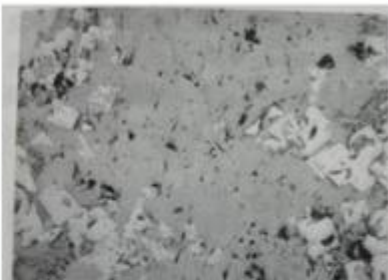


图 4-59 11# 铁酸盐液相包裹固相
铁酸钙—灰白色, 熔蚀状; Fe_2O_3 —浅白色, 粒状, 骸晶状; 硅酸盐液相—棕黄色, 嵌布状; 孔洞—黑色, 不规则; 反光 200 ×

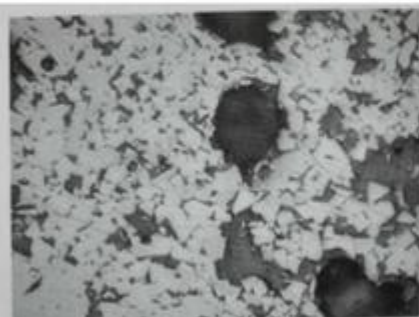


图 4-56 10# 烧结矿中 Fe_2O_3 结晶状况
 Fe_2O_3 —浅白色, 粒状; 硅酸盐液相—深灰色, 嵌布状; 孔洞—黑色, 不规则; 反光 200 ×

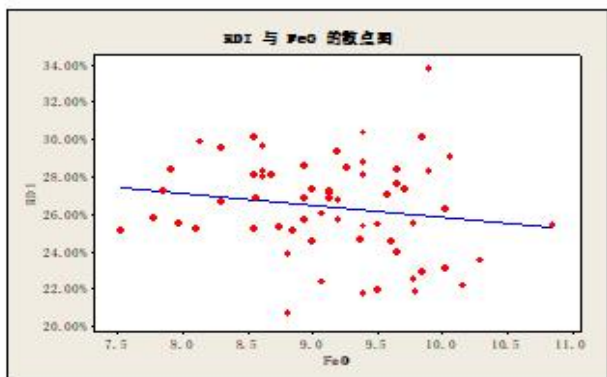
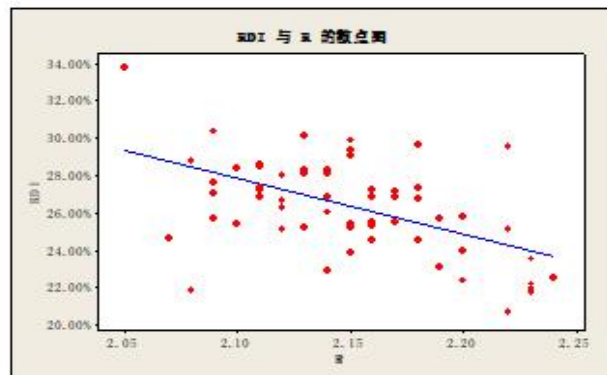


图 4-49 8# 烧结矿中散晶 Fe_2O_3 分布状况
 Fe_2O_3 —浅白色, 棱形状, 鱼脊状; 硅酸盐液相—棕灰色, 嵌布状; Fe_3O_4 —黄灰色, 粒状; 裂纹—黑色, 长条状; 反光 200 ×

- 改善低温还原粉化指数(RDI)的措施:
- ✓ 减少 Fe_2O_3 的结晶, 减少骸晶状赤铁矿
 - ✓ 降低正硅酸钙, 增加铁酸钙生成量
 - ✓ 提高碱度, 提高烧结矿MgO含量

配矿影响-冶金性能

● FeO, R, SiO₂对RDI_(-3.15mm)的影响:



回归分析:RDI 与 FeO, R, SiO₂

回归方程为

$$RDI = 1.12 - 0.00742 FeO - 0.299 R - 0.0276 SiO_2$$

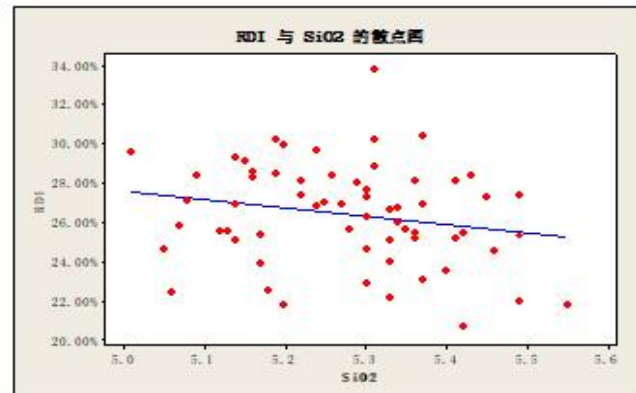
自变量	系数	系数标准误	T	P
常量	1.1204	0.1676	6.68	0.000
FeO	-0.007417	0.004003	-1.85	0.069
R	-0.29940	0.06039	-4.96	0.000
SiO ₂	-0.02757	0.02189	-1.26	0.213

S = 0.0212915 R-Sq = 34.0% R-Sq (调整) = 30.7%

方差分析

来源	自由度	SS	MS	F	P
回归	3	0.0138057	0.0046019	10.15	0.000
残差误差	59	0.0267463	0.0004533		
合计	62	0.0405520			

来源	自由度	Seq SS
FeO	1	0.0011433
R	1	0.0119433
SiO ₂	1	0.0007192



● FeO与R对RDI有负线性影响，SiO₂的影响不显著。

配矿影响-冶金性能



图2 碱度对软化区间和熔融区间的影响

由上图可知：随着碱度升高，开始软化温度、开始熔化温度均呈现下降趋势，而滴落温度却随碱度升高而提高，即初渣熔点随碱度升高而提高，整体性能呈现变差趋势。

配矿影响-有害元素

元素	特点	危害	指标要求	如何控制
K	● 在高炉内循环积累。 ● 使球团矿产生异常膨胀，使还原强度下降。 ● 使烧结矿RDI变差，降低软熔温度，加宽软熔区间。 ● 中上部炉墙结瘤，引起耐才膨胀。	◆ 下料不畅，气流分布不稳定，炉况失常。 ◆ 风口上翘、中套变形。 ◆ 炉体耐材损坏，炉底上涨甚至炉缸烧穿。	➢ 入炉原燃料带入的K₂O负荷不超过1kg/t-Fe ➢ 入炉K₂O+Na₂O的总负荷不超过2.2kg/t-Fe	1、原料控制：限制进厂原料的碱金属含量。 2、炉内排碱：通过降炉渣碱度、降炉温、提镁、提渣中锰的分配比，提高渣中F含量、增加渣量等措施。 3、炉外排碱：采用专业工艺，对烧结机头除尘灰、高炉布袋除尘灰进行排碱处理后，再进入烧结循环使用。
Na	与K相同，但危害性小于K	与K相同，但影响小于K		
Zn	● 在高炉内循环富集，富集量高达80倍。 ● 在炉身上、中、下部甚至煤气上升管中都可能结瘤。 ● 阻碍炉内煤气流动。 ● 消耗高温区的CO和热量。	◆ 炉内煤气通道变小，炉料下降不畅，崩、滑料频繁。 ◆ 高炉难以接收高风量，产量低。 ◆ 燃料消耗升高。 ◆ 影响高炉长寿。	1000立以上高炉入炉原料的锌负荷不超过0.15kg/t-Fe 1000立以下高炉入炉原料的锌负荷不超过0.3kg/t-Fe	1、原料控制：控制原、燃、辅料含锌。 2、使用轻薄料、镀锌废钢炼钢工序产生的除尘灰是重灾区。 3、高炉布袋灰采用专业工艺排锌后再进入烧结循环使用。
Pb	● 沉积于炉底，渗入砖缝，破坏炉底。 ● 铅过多时会在出铁时被带出，并弥散在空气中。	◆ 炉底烧穿。 ◆ 炉前工铅中毒。	铅负荷不超过0.15kg/t-Fe	1、限制原料中的铅含量。 2、炉底排铅。

配矿影响-有害元素

元素	特点	危害	指标要求	如何控制
As	● 降低钢的力学性能和焊接性能	◆ 钢材质量下降 ◆ 轧钢产品出现裂纹等	砷负荷不超过0.1kg/t-Fe	控制原料砷含量
Cu	● 钢中Cu含量超过0.3%时会降低焊接性能。 ● 热脆	◆ 钢材品质下降	入炉原料不超过0.2%	控制原料铜含量
F	● 使炉料粉化，降低软熔温度、降低熔点。 ● 侵蚀硅质耐火材料。	◆ 破坏风口 ◆ 影响炉渣脱硫效果	矿中含F量不超过1%	控制原料F含量
Cl	● 燃烧含氯的煤气，会产生更多的二噁英。 ● 焦炭吸附氯化物后热强度下降。 ● 煤气管道磨蚀加剧。	◆ 环境污染 ◆ 燃料消耗升高 ◆ 煤气管道寿命降低	氯负荷不超过0.6kg/t-Fe	控制原料含氯 烧结矿不喷氯化钙
Ti	● 难还原，影响燃料消耗 ● 【Ti】与【C】、【N】生成TiC、TiN、Ti(CN)，使炉渣粘度急剧增加。 ● TiC、TiN沉积于炉缸、炉底砖缝和内衬表面，护炉。	◆ 高炉冶炼难度大。但也可以用于护炉。	非钒钛矿冶炼的高炉，铁水含钛量控制在0.07%以内为宜。	控制原料含钛
B	● 硼酸铁等硼酸盐熔点低、流动性好，具有较强的黏结作用。 ● 硼酸盐的稳定性阻碍了部分Fe₃O₄的还原，使还原度下降。	◆ 影响烧结矿还原性。	硼对烧结矿质量的影响是双向的，需要结合烧结的原料结构、烧结矿的冶金性能指标，适当调整硼泥等含硼物料的配比。	

配矿影响-有害元素

	K/Na	Zn	Pb	Ti	As	S	Cl-
最大负荷	<5	<0. 2	<0. 15	<5	<0. 1	<4	<0. 6

成本优化-生产控制

高：烧结矿品位要高，为了保证烧结矿质量均衡，烧结矿 SiO_2 含量不低于5.0%、碱度不低于1.8的条件下尽量提高品位；烧结矿转鼓强度要高，1000 m^3 级的高炉要求烧结矿转鼓指数(+6.3mm)不低于71%，2000 m^3 级的高炉要求烧结矿转鼓指数(+6.3mm)不低于74%；烧结矿综合合格率要高，要求TFe、FeO、R三项的综合合格率达到85%以上。

稳：要严格控制烧结矿成份、质量指标波动，波动越小越好，化学指标上重点控制烧结矿品位、碱度、FeO的稳定，生产操作上重点通过控制燃料粒度、混合料水分、终点温度等过程参数的稳定，保证烧结矿综合性能的稳定。

净：强化烧结和高炉槽下筛分，控制入炉烧结矿小于5mm的比例不高于2%。

匀：烧结矿粒度要均匀，减少大块和小颗粒烧结矿的比例，目标为：大于40mm的比例达到5%以下、25~40mm的比例达到15%以内、5~10mm的比例不高于35%。

小：烧结矿粒度要小，烧结矿平均粒度目标为12.5mm，以增加入炉矿的比表面积，改善还原性，降低高炉燃料比。

少：控制硫、磷、钾、钠、铅、锌、砷、铜、钛、氯等有害杂质，烧结矿有害杂质要求如下：

K_2O	Na_2O	Pb_2O_5	ZnO	As_2O_3	TiO_2	CuO	Cl
<0.15%	<0.15%	<0.1%	<0.02%	<0.08%	<0.25%	<0.15%	<0.03%

好：重视烧结矿冶金性能对高炉指标的重要影响，要求烧结矿达到如下要求：

指标	还原度指数RI	低温还原粉化指数 $\text{RDI}_{3,15\text{mm}}$	软化开始温 T_{10}	软化区间 $\text{T}_{40}-\text{T}_{10}$	熔滴区间 T_d-T_s
要基本求	>80%	>65%	>1100°C	<150°C	<150°C
目标	>85%	>72%	>1150°C	<100°C	<100°C

成本优化-生产控制

	理论研究结论	原料结构控制策略	烧结矿成份控制策略	烧结操作控制策略
提高转鼓强度、降低返矿率、降低5~10mm比例	增针状 SFCA；增液相生成量； 提未熔物固结强度	适当配加磁铁矿精粉；赤铁矿颗粒要大；褐铁矿颗粒要小；同化温度要合适	SiO ₂ 在5.0~5.5%；铝硅比0.35~0.4；提高碱度；降低MgO	低水；低碳；厚料层；高负压
提高还原性RI	增加SFCA；增加赤铁矿；增加多孔未熔矿石；减少铁橄榄石	适当配加磁铁矿精粉；增加褐铁矿比例	降低FeO，提高Al ₂ O ₃ ；控制1.9左右的碱度较为适宜	低水；低碳；低负压
提高低温还原粉化指数RDI	增加SFCA；减少骸晶状赤铁矿；减少正硅酸钙	适当配加磁铁矿精粉；增加赤铁矿比例	提高碱度；提高FeO；提高MgO	低水；高配碳；高负压
缩小软化区间和熔滴区间	增加SFCA； 增加赤铁矿； 低温烧结	适当配加磁铁矿精粉；增加赤铁矿比例	降低FeO；降低碱度；降低MgO	低水；低碳；高负压
措施的共性		10~20%的磁铁矿精粉对质量有利	硅、铝硅比	水分
措施的差异	赤铁矿性状	赤铁矿和褐铁矿对各种性能的影响不一致	FeO、MgO、Al ₂ O ₃ 、碱度对各种性能的影响不一致	配碳、负压、料层的控制对性能影响不一致

实操中的误区：

- 过分增加配碳不但不能提高转鼓强度，反而会引起其它性能的恶化，另外如果调整不到位，还可能出现终点滞后、内返矿率上升等现象，烧结操作可能陷入恶性循环中。
- 终点过分提前、烧结矿FeO过高，会造成烧结矿粒度偏大，即使检验的RI变化不大，但入炉后实际的还原性仍会因为粒度过大而出现间接还原度降低，严重影响高炉燃料消耗。

成本优化-生产控制

烧结生产的基本操作规范和制度是否能做到，是影响烧结矿质量、成本的关键，也是一切烧结技术理论能够成立的基础，总结为以下16个字：

低水低碳 厚铺慢转 稳定配混 严控终点



低亚铁
薄红层

7.5%(R=1.9)

150mm



高配碳、未完全燃烧的机尾断面

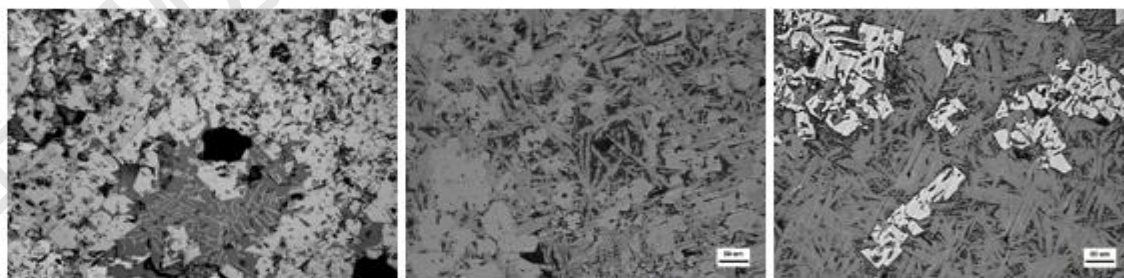
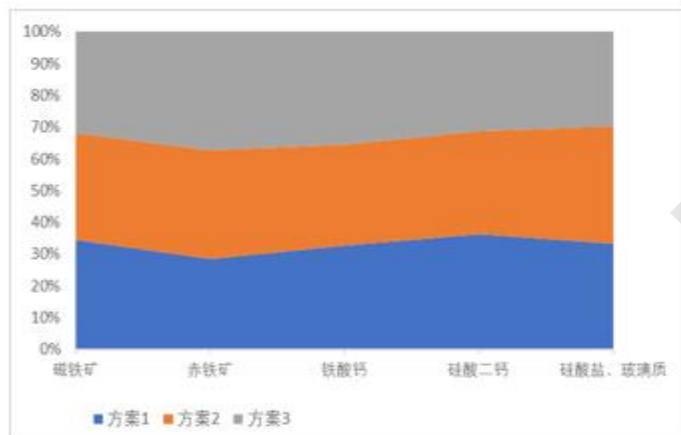


低配碳、完全燃烧的机尾断面

成本优化-生产控制-厚料层烧结

● 料层厚度

方案	料层厚度 mm	焦粉配比, %	FeO, %	R	RI, %	RDI _{-3.15mm} %	T4, °C	ΔT4-40, °C
1	700	4.3	11.6	2.14	84.15	25.56	1106	148
2	800	4.3	11.6	2.14	84.62	26.43	1105	153
3	800	4	9.5	2.11	87.84	26.57	1110	139



注：白色—赤铁矿 灰白色—磁铁矿 兰灰色—CF 灰黑色—硅酸盐 黑色—孔洞

方案1

方案2

方案3

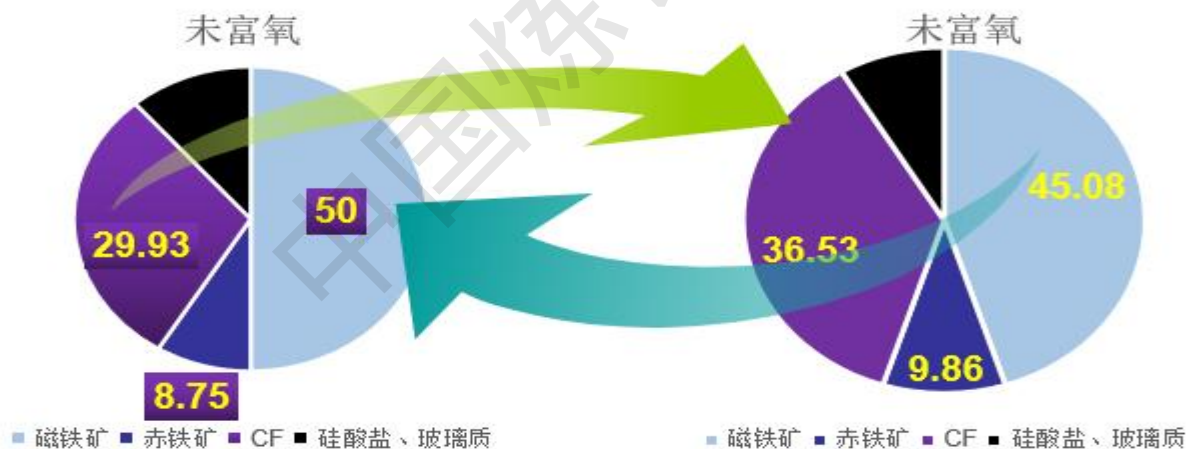
料层厚度提高，自动蓄热作用增强，有利于减少燃料配比，烧结矿的还原度约提高3.7%，软化区间缩小 9°C

成本优化-生产控制-富氧烧结

● 富氧烧结

名称	化学成分		冶金性能				
	FeO	R	RI, %	RDI, %	T4, °C	T40, °C	T4—40, °C
富氧	9.29	2.15	87.09	27.28	1148	1288.5	140.5
未富氧	10.18	2.15	84.48	25.65	1132	1285.5	153.5
变化	-0.89	0	2.61	1.63	11	-4	-15

矿物组成

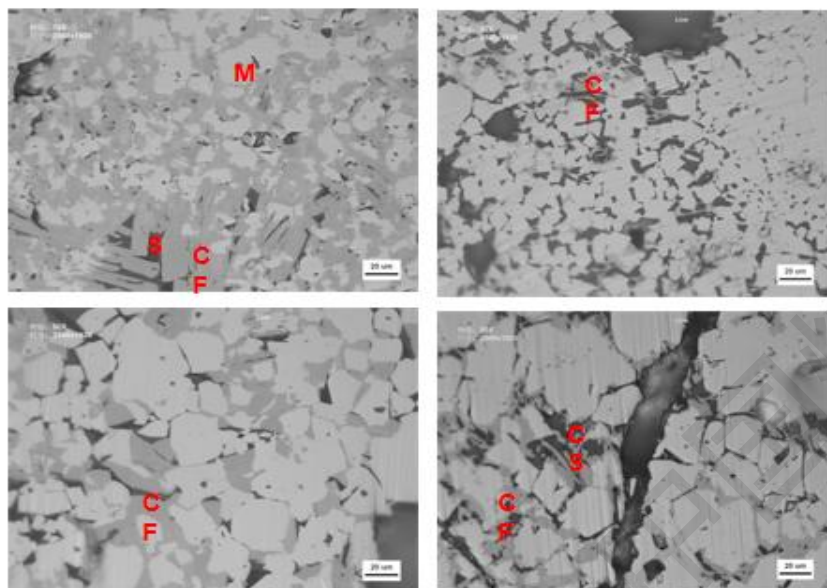


CF含量增加了6.6%，磁铁矿减少4.92%，赤铁矿增加1.11%

成本优化-生产控制-富氧烧结

● 富氧烧结

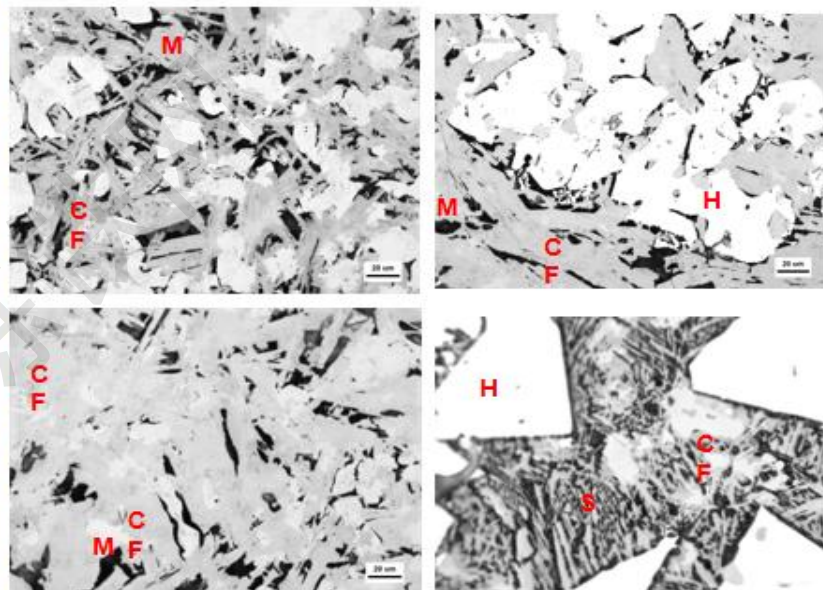
富氧前



显微
结构
改善

- 富氧前烧结矿中磁铁矿晶粒较大，有些区域聚焦出现，铁酸钙多呈板柱状，烧结矿的弱粘结区出现了粗大的裂纹。
- 富氧后烧结矿的CF含量分布很广，或以针网状、针柱状与熔蚀态的磁铁矿呈交织熔蚀结构，料层上部烧结矿以针状、纤维状析出于硅酸盐中呈熔融相，熔融相中的铁矿粉氧化为赤铁矿。整体烧结矿中未见有裂纹产生，使得烧结矿强度和冶金性能较好。

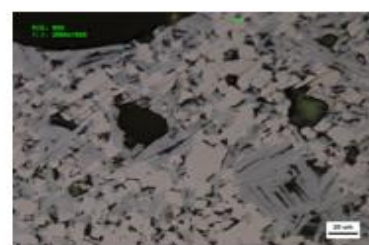
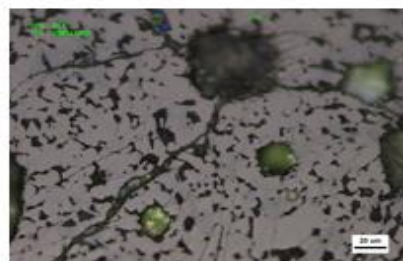
富氧后



成本优化-生产控制-强混应用

● 强混

名称	FeO, %	RI, %	RDI-3.15mm, %	冶金性能		
				软化开始温度 ℃	软化終了温度 ℃	软化区间 ℃
投用后	10.71	86.58	28.33	1120	1275	155
	9.38	88.66	29.43	1137.5	1282.5	145
投用前	10.13	87.07	30.52	1128	1276	148



注：白色—赤铁矿 灰白色—磁铁矿 兰灰色—CF 灰黑色—硅酸盐 黑色—孔洞

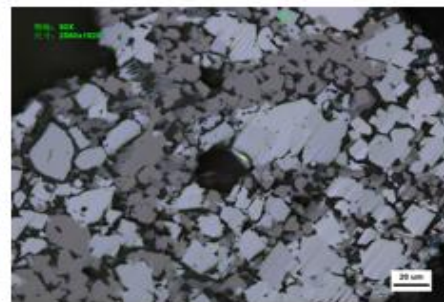
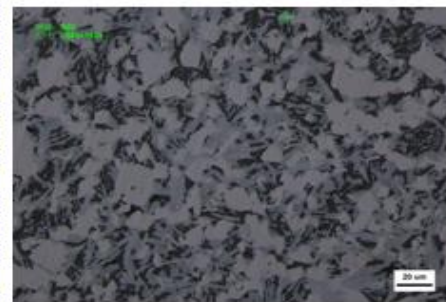
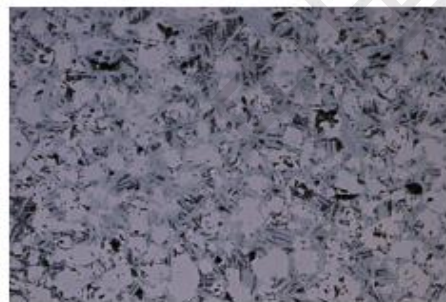
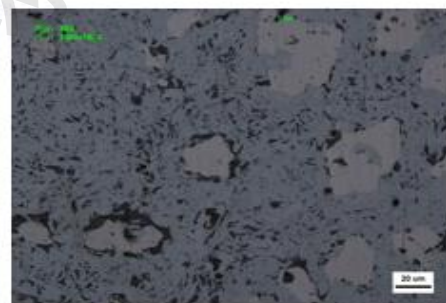
强混投用前烧结矿显微结构

成本优化-生产控制-强混应用

强混投用后参数优化前后显微结构变化



装料量由15t调整至9t，混合时间减少至35s，水分8.2%



注：白色—赤铁矿 灰白色—磁铁矿 兰灰色—CF 灰黑色—硅酸盐 黑色—孔洞

前期烧结矿显微结构

优化后烧结矿显微结构

成本优化-生产控制-高煤比

某1800高炉高煤比生产实践数据

焦比	煤比	燃料比	矿批	焦批	富氧	顶压	风温	炉容
320	195	515	60	11.4	21000	250	1220	1860
原料结构								
烧结矿	65	印度球团	5	自产球团	8	pb块	22	
焦炭结构								
准一干	80	经济焦	20					

详情咨询：魏红玉13598115209

成本优化-生产控制-低燃料比

某1300高炉低燃料比生产实践数据

焦比	煤比	燃料比	矿批	焦批	富氧	顶压	风温	炉容
340	165	505	42	8.4	9000	241	1200	1280
原料结构								
烧结矿	75	自产球团	20	纽曼筛后	5	综合铁	56.5	
焦炭结构								
准一干	85	湿焦	15					

详情咨询：魏红玉13598115209